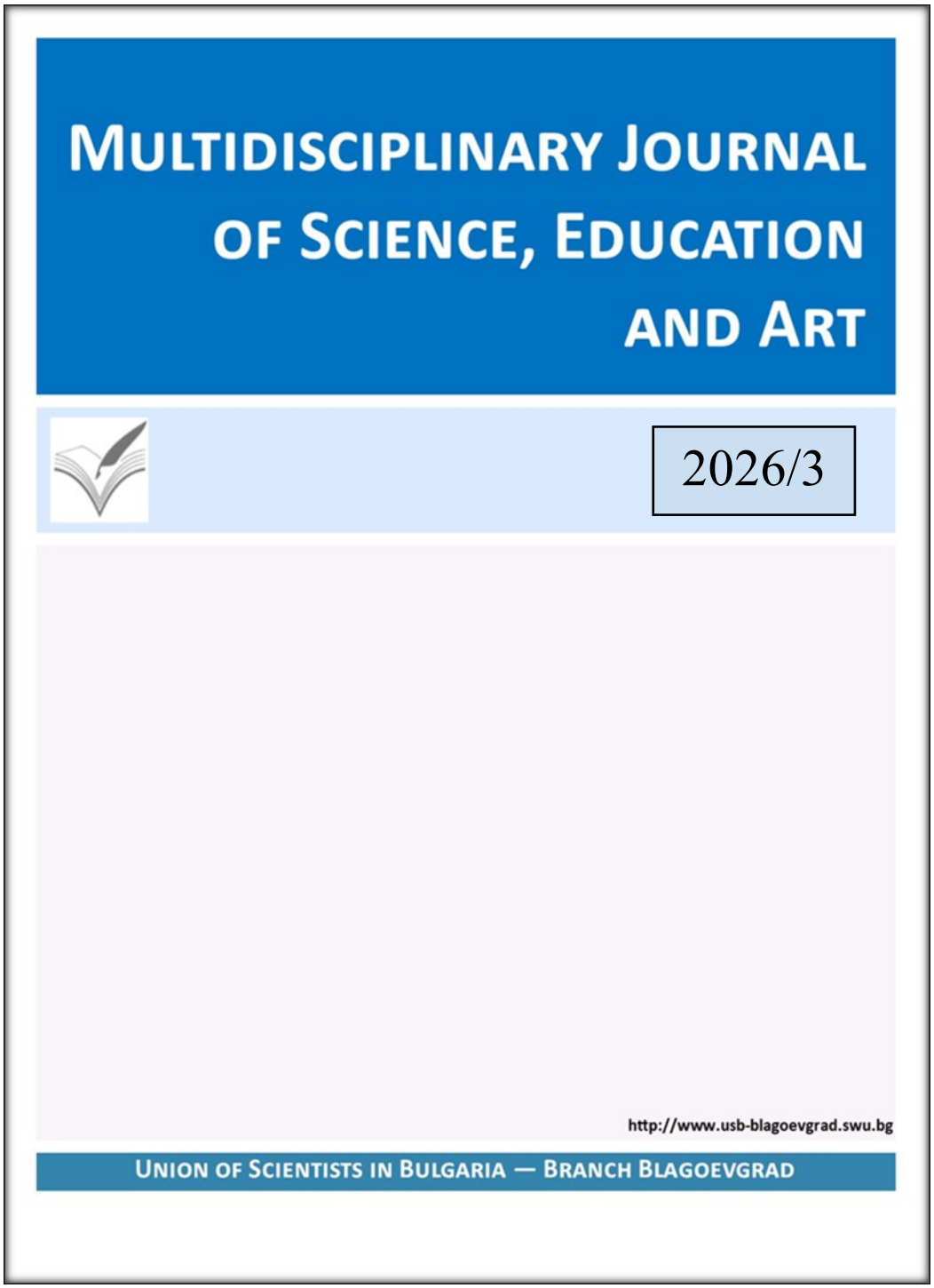

MULTIDISCIPLINARY JOURNAL OF SCIENCE, EDUCATION AND ART
2026/3
http://www.usb-blagoevgrad.swu.bg
UNION OF SCIENTISTS IN BULGARIA — BRANCH BLAGOEVGRAD

South-West University "Neofit Rilski"- Blagoevgrad, Bulgaria

- Assoc. Prof. Krasimira Marulevska, PhD
- Prof. Nikolina Ognenska, PhD
- Prof. Ilia Giujdenov, PhD
- Prof. Vaska Stancheva – Popcostadinova, PhD
- Prof. Viara Kiyrova, PhD
- Prof. Boris Manov, PhD
- Prof. Snejina Andonova, PhD
- Prof. Yanka Stoimenova, PhD
- Prof. Miglena Simonska, PhD
- Assoc. Prof. Emilia Patarchanova, PhD
- Assoc. Prof. Dimitrina Stefanova, PhD
- Assoc. Prof. Teodor Gergov, PhD
- Assoc. Prof. Diana Ivanova, PhD
- Assoc. Prof. Petrana Stoykova, PhD
- Assoc. Prof. Elena Stavrova, PhD
- Assoc. Prof. Ralitsa Stanoeva, PhD
- Assoc. Prof. Yuliana Kovachka, PhD
- Assoc. Prof. Blaga Djorova, PhD
- Assoc. Prof. Milena Levunlieva, PhD
- Assoc. Prof. Zarina Markova, PhD
- Assoc. Prof. Mirela Kyuchukova, PhD
- Assoc. Prof. Radoslava Topalska, PhD
- Professor Assistant Magdalena Lobutova, PhD
- Professor Assistant Blagovesta Koyundzhiyska-Davidkova, PhD
- Professor Assistant Lyubka Nenova, PhD
- Professor Assistant Tsvetelina Hadgieva, PhD

National Research University Higher School of Economics – Moscow, Russia

- Prof. D.s. Elena Nikolaevna Knyazeva

Kazakh Ablaikhan University of International Relations and World Language, Kazakhstan

- Prof. D.s Dina Muvtahovna Jussubalieva

Eurasian Technological University, Kazakhstan

- Prof. D.s Rimma Ramazanovna Massyrova

Institute of Social Sciences, Belgrade, Serbia

- Prof. Mirko Blagojevic, PhD

Coordinator Italian Minister of education of the national network of educational Istitutions, Italy

- Prof. Stefano Cobello, PhD

Bartin University, Education Faculty, Department of Educational Sciences, Turkey

- Prof. Çetin Semerci, PhD
- Prof. Nuriye Semerci, PhD

Yildiz Technical University, Turkey

- Assoc. Prof.Bünyamin Bavli, PhD

Cherepovets State University - Cherepovets, Russia

- Prof. D.s. Nataliia Vitalyevna Ivanova
- Prof. D.s. Elena Viktorovna Yakovleva

Goce Delcev University – Stip, Republic of North Macedonia

- Prof. Trayche Stoyanov, PhD
- Prof. Sonja Petrovska, PhD

University of Niš, Faculty of Arts of Niš, Niš, Serbia

- Prof. Danijela Ilić, PhD

Korkyt Ata Kyzylorda State University – Kazakhstan

- Assoc. Prof. Almakul Abdimomynova Shakirbekovna, PhD
- Assoc. Prof. Kuralai Djrauova Serikovna, PhD
- Assoc. Prof. Timur Ibraevich Kenshinbai, PhD

Aleksander Xhuvani Universitety – Elbasan, Republic of Albania

- Assoc. Prof. Altin Idrizi, PhD
- Assoc. Prof. Lindita Durmishi, PhD

Софийски университет "Св. Климент Охридски"

- Проф. дпн Вяра Гюрова

Laboratory Professor of History's Didactics, Aristotle University of Thessaloniki, Greece

- Dr. Fotini Toloudi

СЪДЪРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ **7**

ВЪЗДЕЙСТВИЕ НА УРБАНИЗАЦИЯТА ВЪРХУ РЕЧНИТЕ ЕКОСИСТЕМИ В СОФИЯ **9**
Стоян Кюлев, Мирослав Иванов, Емилия Варадинова

ОПАЗВАНЕ НА АТМОСФЕРНИЯ ВЪЗДУХ В БЛАГОЕВГРАД: НОРМАТИВНА РАМКА, РЕГИОНАЛНИ ПОЛИТИКИ И ТЕНДЕНЦИИ В КАЧЕСТВОТО НА ВЪЗДУХА **23**
Александър Гошев, Красимир Стоянов, Емилия Варадинова

ГЕОЛОГО-МОРФОСТРУКТУРНИ И МОРФОХИДРОГРАФСКИ ОСОБЕНОСТИ НА ОБЛАСТТА КРАИЩЕ В РЕПУБЛИКА СЪРБИЯ **56**
Милена Миленова, Красимир Стоянов, Галина Безинска

ОСНОВНИ ПОЛОЖЕНИЯ В MESH ТЕХНОЛОГИЯТА – ПЕРСПЕКТИВИ ЗА РАЗВИТИЕ **71**
Цвета Ивана Бикова, Велин Кралев

STUDY OF INCLUSIVE ELECTRON SCATTERING FROM ^{12}C NUCLEUS AND COMPARISON WITH EXPERIMENTALLY OBSERVED DATA **81**
Boyana Georgieva, Martin Ivanova, Anton Antonov

ИНТЕРАКТИВНИЯТ УЧЕБЕН ЕКСПЕРИМЕНТ В ОБУЧЕНИЕТО ПО ХИМИЯ И ФИЗИКА: СЪВРЕМЕННИ ПОДХОДИ, ДИГИТАЛНА ТРАНСФОРМАЦИЯ И ОБРАЗОВАТЕЛНИ ПЕРСПЕКТИВИ **88**
Евел Комаров, Дамяна Грънчарова

ВИРТУАЛНИ И ИНТЕРАКТИВНИ СРЕДИ В ОБУЧЕНИЕТО ПО ПРИРОДНИ НАУКИ **100**
Петя Стефанова, Дамяна Грънчарова

GAMIFICATION IN CHEMISTRY EDUCATION: TEACHERS' PERCEPTIONS OF ITS IMPACT ON MOTIVATION AND LEARNING **111**
Borislava Pavlova, Aleksandra Tencheva

НАГЛАСИ НА УЧИТЕЛИТЕ КЪМ ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ИНТЕЛИГЕНТНИ ОБРАЗОВАТЕЛНИ ПОМОЩНИЦИ В УЧИЛИЩНОТО ОБУЧЕНИЕ **127**
Катерина Калайджиева, Костадин Самарджиев

APPROBATION OF A PROJECT-BASED LEARNING MODEL IN 10TH GRADE PHYSICS AND ASTRONOMY: THE SECTION "LIGHT" **134**
Anastasia Guenova, Ralitsa Stanoeva

ИНТЕРДИСЦИПЛИНАРЕН ПОДХОД ПРИ ИЗУЧАВАНЕ НА СМЕСИ: ОТ МОЛЕКУЛЯРНА ХИМИЯ ДО STEM ПРИЛОЖЕНИЯ **141**
Камелия Богословова, Сияна Стоименова, Христина Димова

ИНТЕРДИСЦИПЛИНАРНИ STEM МЕТОДИ ЗА РАЗДЕЛЯНЕ НА СМЕСИ: ОТ ЛАБОРАТОРНИ ОПИТИ ДО ТЕХНОЛОГИИ ЗА ГЛОБАЛНО ПРЕЧИСТВАНЕ **152**

Здравко Йорданов, Иванина Еленкова, Христина Димова

ЗАМЪРСЯВАНЕ НА ВЪЗДУХА: ИНТЕРДИСЦИПЛИНАРЕН ПОДХОД И STEM ИНОВАЦИИ **161**

Алекса Везенкова, Ивет Стоилова, Христина Димова

НАУКАТА ПАЗИ ПРИРОДАТА: ОТ ЗАМЪРСЯВАНЕТО ДО РЕШЕНИЕТО **172**

Борислав Брусарски, Ивайла Григорова, Нася Борисова, Максимилиана Чаван-Рок, Цветелина Пенева, Мариана Стамболийска

КРЕАТИВНИ УМОВЕ НА БЪДЕЩЕТО – 2026

Първата **Научна конференция по природни науки, математика и информатика за студенти и ученици „Креативни умове на бъдещето“ – 2026** се проведе в периода 24 – 27 март 2026 г. в Югозападния университет „Неофит Рилски“. Събитието беше организирано от Природо-математическия факултет към университета, Студентския съвет и Съюза на учените в България (СУБ) – клон Благоевград.

Научната конференция беше част от дейностите, свързани с честванията на **50-годишнината от създаването на Югозападния университет „Неофит Рилски“** и **30-годишнината от създаването на Студентския съвет към университета**.

Основната цел на конференцията е да предостави възможност за изява и обмяна на креативни идеи между студенти, ученици и докторанти.

Конференцията събра над 120 участници – научни ръководители, студенти, докторанти, учители и ученици, които представиха свои научни разработки и проекти в областта на природните науки, математиката, информатиката и технологиите. Представянията се отличиха с креативност, задълбоченост и убедителност.

Ректорът на университета проф. д-р Николай Марин поздрави участниците и изрази подкрепата си към инициативата, като подчерта значението на подобни форуми за развитието на младите таланти и насърчаването на научното мислене.

В рамките на форума се проведе и ученическо състезание с участието на ученици от ЕГ „Акад. Людмил Стоянов“ – Благоевград, ПГИ „Иван Илиев“ – Благоевград, ПМГ „Акад. Сергей Корольов“ – Благоевград, 3. ОУ „Димитър Талев“ – Благоевград, 7. СУ „Кузман Шапкарев“ – Благоевград, СУ „Йордан Йовков“ – с. Рибново, ОУ „Св. св. Кирил и Методий“ – Дупница, ОУ „Проф. Марин Дринов“ – Кюстендил и 2. СУ „Акад. Емилиян Станев“ – София.

Всички участници получиха сертификат за участие.

Учениците от 11. и 12. клас, показали отлични резултати, получиха и сертификати с оценка, която може да бъде използвана при кандидатстване във всички бакалавърски програми в Природо-математическия факултет на Югозападния университет.

На 27 март университетът беше домакин на най-вълнуващата част от събитието – представянето и защитата на интердисциплинарните ученически проекти, което даде възможност на младите участници да се срещнат с реалната академична среда. Това преживяване не само разшири техните хоризонти, но и ги вдъхнови да продължат развитието си в научната сфера.

В подкрепа на събитието активно се включиха „Архитекти на бъдещето“, като подариха на всеки ученик символичен комплект – тефтер за бъдещи идеи и дъбче, осигурено от инициативата „Клуб 200: Дъбче с бъдеще“, което участниците да засадят и отглеждат.

Организационният комитет изразява специална благодарност към всички участници за тяхната смелост и проявена креативност при представянето на проектите, както и към техните научни ръководители.

ВЪЗДЕЙСТВИЕ НА УРБАНИЗАЦИЯТА ВЪРХУ РЕЧНИТЕ ЕКОСИСТЕМИ В СОФИЯ

Стоян Кюлев, Мирослав Иванов, Емилия Варадинова

Югозападен университет „Неофит Рилски“, ул. „Иван Михайлов“ 66, 2700 Благоевград, България

РЕЗЮМЕ

Настоящата обзорна статия разглежда въздействието на урбанизацията върху речните екосистеми в София чрез преглед на научна литература, европейски нормативни документи и публично достъпни данни за състоянието на градските реки. Анализът е направен на базата на четири основни групи натиск: хидроморфологични изменения на речните корита, постъпване на отпадъчни и дъждовно-отточни води, химично замърсяване и натрупване на утайки, както и загуба на естествени крайречни зони. Според наличните данни, управлението на градските реки не може да се основава единствено на инженерни решения за отводняване и защита от наводнения, а изисква всеобхватен подход, включващ контрол върху точковите и дифузните източници на замърсяване, възстановяване на крайречните буфери, природосъобразни решения за управление на дъждовните води и мониторинг, съобразен с целите на Рамковата директива за водите.

КЛЮЧОВИ ДУМИ: урбанизация, градски реки, София, хидроморфология, повърхностен отток, замърсяване, утайки, екологичен статус, Рамкова директива за водите

IMPACT OF URBANIZATION ON RIVER ECOSYSTEMS IN SOFIA

Stoyan Kulev, Miroslav Ivanov, Emilia Varadinova

Southwestern University "Neofit Rilski", 66 Ivan Mihaylov Str., 2700 Blagoevgrad, Bulgaria

ABSTRACT

This review article examines the impact of urbanization on river ecosystems in Sofia through a review of scientific literature, European regulatory documents and publicly available data on the state of urban rivers. The analysis is based on four main pressure groups: hydromorphological changes in riverbeds, input of waste and stormwater, chemical pollution and sediment accumulation, and loss of natural riparian areas. According to the available data, the management of urban rivers cannot be based solely on

engineering solutions for drainage and flood protection, but requires a comprehensive approach, including control of point and diffuse sources of pollution, restoration of riparian buffers, nature-friendly stormwater management solutions and monitoring consistent with the objectives of the Water Framework Directive.

KEYWORDS: urbanization, urban rivers, Sofia, hydromorphology, surface runoff, pollution, sediments, ecological status, Water Framework Directive

1. Увод

Урбанизацията е един от най-интензивните процеси на пространствени промени в съвременния свят и има пряко влияние върху функционирането на речните екосистеми. Разширяването на градовете променя начина, по който водата се задържа, инфилтрира и оттича в речните басейни, като увеличава дела на непропускливите повърхности, намалява естествените почвено-растителни буфери и концентрира множество източници на замърсяване в рамките на ограничена територия (McGrane, 2016; Walsh et al., 2005). Това означава, че градските реки са едновременно елемент на природната система и антропогенизиран инфраструктурен обект, подложен на постоянен натиск от застрояване, транспорт, инженерни съоръжения и функции в посока рекреация.

Урбанизацията оказва голямо влияние върху хидрологичните, физикохимичните и биологичните показатели, изразяващи се в по-високи и по-краткотрайни пикови оттоци, по-чести ерозионни процеси, увеличен пренос на фини седименти и замърсители, понижено разнообразие на местообитанията и доминиране на по-толерантни към замърсяване видове (Walsh et al., 2005; Booth et al., 2016). Отвъд чисто екологичните последствия, тези промени имат и социално значение, защото влияят върху риска от наводнения, санитарното състояние на градската среда, качеството на публичните пространства и възможностите за включване на реките в устойчивото градско планиране.

В европейски контекст проблемът има и ясна нормативна проява. Рамковата директива за водите (Directive 2000/60/EC) поставя изискване за предотвратяване на влошаването и за постигане на добро екологично и химично състояние на повърхностните води, като подчертава значението на всеобхватното управление на речните басейни. Същевременно по-новите оценки на Европейската агенция по околна среда показват, че значителен дял от повърхностните водни тела в Европейския съюз все още не достигат добро екологично състояние, което е индикация за устойчивостта на натиска и за необходимостта от по-ефективни мерки (EEA, 2025). Данните за химичния статус също остават тревожни, като само по-малко от една трета от повърхностните водни тела в ЕС се оценяват като в добро химично състояние (EEA, 2024).

Основната задача на настоящата статия е да се проследят механизмите, чрез които урбанизацията въздейства върху речните екосистеми в София, да се посочат основните източници на натиск, да се обобщят най-често описваните екологични ефекти и да се изведат насоки за бъдещи научни изследвания и решения на управленско ниво.

2. Изследван район – София като модел на урбанизирана речна среда

София е разположена в котловинна територия, оградена от планински масиви, което благоприятства формирането на гъста и пространствено разнообразна речна мрежа. В хидрографско отношение градът е свързан с басейна на р. Искър и включва както главното течение на реката в периферията на урбанизираната зона, така и множество по-малки притоци и дерета, преминаващи през силно застроени квартали. Това създава условия в рамките на един град да се наблюдават различни по степен на въздействие речни участъци – от неповлияни и сравнително по-слабо повлияни периферни и планински сегменти до силно натоварени и коригирани градски участъци.

Град София, като урбанизирана територия, е особено подходящ обект за анализ поради няколко причини. От голямо значение е фактът, че градът съчетава дълга история на градско разширяване с бързо съвременно застрояване. В допълнение, голяма част от реките в града имат едновременно отводнителни, екологични и ландшафтни функции, което често води до конфликт между инженерните и екосистемните подходи при тяхното управление. На трето място, през последните години темата за градските реки в София навлезе по-видимо в институционалния и обществен дебат, включително чрез инициативи на Министерството на околната среда и водите, които сочат необходимостта от установяване на основните източници на замърсяване и от по-системно наблюдение на речните участъци в града (МОСВ, 2024а).

Наличните научни публикации за отделни софийски реки показват, че въздействията не са еднотипни. Например, екологичното състояние на Витошките реки, преминаващи през резерватите Бистришко Бранище и Торфено Бранище показват неповлияни условия и висок екологичен статус (Фикова и др., 2019). Анализите за р. Владайска разкриват ясна разлика между горни и долни участъци, като долното течение, след преминаване през урбанизираната зона е с трайно по-неблагоприятни характеристики на водното качество (Радева, 2025).

3. Методология

Статията използва метода на обзорното изследване като цели да систематизира основните аспекти на проблема, свързан с въздействието на урбанизацията върху речните екосистеми в София. Използвани са научни публикации от периода 2015-2025 г., както и по-ранни трудове с голямо значение за проблема. Анализът на тематиката е насочен към няколко ключови области: въздействие

на урбанизацията върху хидрологията и качеството на водата; хидроморфологични изменения в градска среда; дъждовен отток и токсични замърсители; роля на утайките като депо на замърсители; биологични реакции и индикатори за екологичен статус; възстановяване и управление на градски реки.

В обзорния преглед са включени общо над 40 научни и нормативни източника. Критериите за избор на публикации включват: 1) научна връзка по темата за урбанизирани речни екосистеми; 2) рецензирана публикация; 3) актуалност на изследванията, с приоритет върху публикации от последното десетилетие; 4) приложимост към европейски и градски речни системи; 5) наличие на емпирични данни или концептуални модели, свързани с хидроморфологични промени, замърсяване и екологичен статус. При подбора е търсен баланс между международни обзорни публикации, специализирани казусни изследвания и документи с нормативен и управленски характер.

Освен научната литература са използвани и официални документи със значение за анализа:

- Рамковата директива за водите, насоките по общата стратегия за нейното прилагане, документи на Европейската комисия по градските отпадъчни води и публични оценки на Европейската агенция по околна среда;
- Националното законодателство, свързано с управление и опазване на водните ресурси (Наредба № 4/2012 за характеризиране на повърхностните води. Държавен вестник, бр. 22, 2013; Закон за водите (Обн., ДВ, бр. 67 от 27.07.1999 г., изм. и доп., бр. 54 от 4.07.2025 г.)
- За българския контекст е включена и междинната оценка на значимите проблеми по управление на водите в Дунавския район, тъй като София попада в неговия обхват и именно тази управленска рамка е важна за интерпретацията на натиска и възможните мерки (Басейнова дирекция „Дунавски район“, 2022-2027).

Методът на работа включва: 1) преглед и групиране на източниците по теми; 2) извеждане на основните категории натиск върху градските реки; 3) съпоставка между общите закономерности, установени в международната литература, и наличните такива за София; 4) анализ на резултатите. Поради обзорния характер на изследването, акцент е поставен върху обобщаване на вече налични знания.

4. Резултати и дискусия

4.1. Морфологични изменения на речните корита

Един от най-видимите ефекти на урбанизацията върху речните системи е преобразуването на речните корита чрез корекции, изправяне, облицоване, изграждане на подпорни стени, прагове и

други хидротехнически съоръжения. В градска среда тези въздействия обикновено се мотивират с необходимостта от бързо отвеждане на водите, защита от наводнения или освобождаване на пространство за застрояване и транспорт. От екологична гледна точка обаче подобни интервенции често водят до опростяване на морфологичната структура на руслото, редуциране на напречното и надлъжното разнообразие и прекъсване на връзката между реката и нейната заливна тераса (Buffagni et al., 2002). Посоченото компрометира оценката по морфологични елементи за качество, която има подкрепяща роля при определяне на екологичното състояние на повърхностните води (Наредба №4/2012)

Морфологичните промени имат значение защото модифицират цялата среда, в която протичат хидрологичните и биологичните процеси. Изправянето на коритата увеличава скоростта на оттичане и може да усилва ерозионните процеси. Облицоването с бетон или камък редуцира контактната зона между вода, седимент и крайречна растителност. Премахването на естествената растителност по бреговете ограничава сенчестия режим, повишава температурните колебания и намалява притока на органична материя, която поддържа хранителните вериги в течащите води.

4.2. Повърхностен отток и промяна в хидрологичния режим

Увеличаването на непропускливите повърхности – улици, паркинги, покриви, тротоари, индустриални площадки - е ключов механизъм, чрез който урбанизацията променя речния отток. Когато валежната вода не може да се инфилтрира в почвата, тя се насочва бързо към дренажната система и оттам към реките. В резултат от тези процеси се наблюдават по-високи пикови води и по-бързо водно оттичане. Подобни промени създават натиск върху руслата, усилват ерозията, преместват и натрупват фини седименти и променят местообитанията на водните организми (McGrane, 2016).

Проучванията по темата подчертават, че промяната в хидрологичния режим е една от основните характеристики на урбанизирания басейн и не бива да се разглежда само като инженерно предизвикателство. Тя е и екологичен проблем, защото честите колебания на водните нива и повишената динамика на оттока водят до нестабилност на местообитанията на организмите, загуба на техните яйца, ларви и млади стадии, както и до по-трудно им възстановяване

4.3. Антропогенно замърсяване

4.3.1. Отпадъчни и дъждовно-отточни води

Градските реки се замърсяват както от точкови, така и от дифузни източници. Точковите източници включват зауствания на отпадъчни води, аварийни изпускания, преливници от

канализационни системи и недостатъчно пречистени води. Европейската комисия отбелязва, че градските отпадъчни води продължават да бъдат един от основните източници на замърсяване на водите, когато не са адекватно събрани и третирани по действащите правила (European Commission, n.d.-a). Това е особено важно за урбанизирани реки с ограничен воден обем и по-ниска разредителна способност.

Дифузният принос от антропогенния повърхностен отток е не по-малко значим. Водата, оттичаща се от пътни настилки, паркинги и покриви, пренася суспендирани вещества, тежки метали, нефтопродукти, полициклични ароматни въглеводороди, пестициди, пластификатори и други микрозамърсители. Обзорът на Cojoc et al. (2024) показва, че най-висок екотоксикологичен риск в градския отток често е свързан с метали, ПАХ и пестициди. Анализът на замърсители в пътната прах подчертава, че медта и цинкът са сред най-често докладваните елементи, произхождащи от износване на спирачки, гуми и други транспортни компоненти (Hwang et al., 2016).

4.3.2. Химично замърсяване и натрупване на утайки

В градските реки качеството на водата не може да се оценява само по водната фаза. Седиментите и утайките играят ролята на дългосрочно депо за замърсители, които могат да се акумулират и впоследствие да бъдат ремобилизирани при високи води или механично смущение. Глобалният обзор на Alfee et al. (2025) показва, че замърсяването на речните седименти е широко разпространено и често се подценява в управленските практики, въпреки значението му за екологичния риск. Сходни изводи правят и Hossain et al. (2024), които подчертават ролята на потенциално токсичните елементи в седименти, вода и биота.

Натрупването на фини утайки е свързано както с ерозия от строителни и урбанизирани площи, така и с променена руслова динамика вследствие на корекции на коритата на реките. Когато тези фини наноси са натоварени със замърсители, те могат да влошат условията за бентосните организми, да покриват грубия субстрат и да нарушават газообмена в дънната среда. При последващо разместване замърсителите се връщат във водата и създават вторичен риск.

4.3.3. Загуба на естествени крайречни зони

Крайречните зони са сред най-силно застрашените компоненти на градските речни екосистеми. При интензивно застрояване естествените буферни зони се стесняват, фрагментират или изчезват изцяло. Това води до загуба на филтриращата им роля по отношение на повърхностния отток, до намалена стабилност на бреговете и до по-слаб екологичен обмен между водната и сухоземната среда. Освен това редуцирането на крайречната растителност понижава естетическата и

рекреационната стойност на реката, което допълнително отслабва обществената подкрепа за нейното опазване.

4.4. Ефекти върху речните екосистеми

Въздействията върху градските реки се проявяват в речните екосистеми чрез сложна верига от физични, химични и биологични реакции. Особено важно е, че се наблюдава нарушаване на естествените местообитания. Редуцира се пространствената хетерогенност на речното руслото, а заедно с нея и разнообразието на микросредите, необходими за различни групи организми. Хомогенизираните и облицовани корита не осигуряват достатъчно укрития, места за размножаване и хранене, което обяснява защо много чувствителни таксони постепенно се заменят от по-устойчиви форми.

Наблюдава се и намаляване на биологичното разнообразие, като това засяга различни трофични нива – от микроорганизми и фитобентос до макрозообентос и риби. Реакцията може да бъде пряко следствие от токсично въздействие, но и косвен резултат от промени в местообитанията, кислородния режим, температурните условия и трофичната база. Всичко това показва, че екологичната деградация не е еднофакторен резултат, а системен отговор на наслагващи се урбанизационни процеси (Walsh et al., 2005).

На трето място, променя се функционирането на самата екосистема. Органичното натоварване и внасянето на биогенни елементи могат да доведат до понижен разтворен кислород, до усилена микробна активност и до нарушения в процесите на самопречистване. Изследване за сезонната динамика на разтворения кислород във Владайска река показва, че в урбанизирания участък кислородните условия са чувствителни към температура, БПК5 и ХПК, което е пряко свързано с екологичния риск в градска речна среда (Марчева и др., 2024). Когато към това се прибавят и измененията в хидрологичния режим, способността на речната система да компенсира натиска отслабва още повече.

Крайречните зони са сред най-силно застрашените компоненти на градските речни екосистеми. Те служат като ретензионни басейни и могат да поемат високи вълни в случай на наводнения. При интензивно застрояване се унищожава крайречната растителност, естествените буферни зони се стесняват, фрагментират или изчезват изцяло. Това води до загуба на филтриращата им роля по отношение на повърхностния отток, до намалена стабилност на бреговете и до по-слаб екологичен обмен между водната и сухоземната среда. Освен това редуцирането на крайречната растителност понижава естетическата и рекреационната стойност на реката, което допълнително отслабва обществената подкрепа за нейното опазване.

Всички тези процеси се отразяват на екологичния статус на лотичните водни тела. Съгласно Рамковата директива за водите и националните родни регулации оценката на екологичното състояние се основава върху биологични елементи, подпомогнати от физикохимични и хидроморфологични показатели (Directive 2000/60/EC; CIS Guidance No. 7/2003, Наредба N 4/2012). Това позволява да се приеме, че влошаването на състоянието на градските реки би следвало се разбира не само като химичен или санитарен проблем, а като нарушение на цялостната екосистемна структура и функция на лотичните екосистеми.

4.5. София като моделен обект: синтез на налични данни и локални наблюдения

Публикуваните изследвания за София и софийските реки потвърждават общите закономерности, регистрирани при негативни въздействия върху градски реки. При р. Владайска е установено, че горните участъци могат да показват относително по-добро състояние, докато долните части, повлияни от градската територия и от натрупването на антропогенен натиск, се характеризират с трайно по-лошо качество на водата (Радева, 2025). Този контраст е характерен за много градски реки, при които урбанизационният сигнал се „записва“ по дължината на течението.

Данните за р. Искър в района на София също насочват към проблеми, свързани с нутриентно натоварване. В публикацията на Стефанова и др., (2021) се съобщава за силно замърсяване по отношение на NH4+ и PO43- в изследваните станции. Тези резултати са важни защото показват, че дори голяма река със сравнително по-голям обем вода може да проявява чувствителност към урбанизационен и техногенен натиск.

Допълнителен негативен ефект се наблюдава и върху ключовите редуциращи съобщества, които са позиционирани в основата на хранителната верига във водните екосистеми. Изследвания на реките Дървенишка, Владайска и р. Искър, показват наличие на микробиологичен риск и на форми на антибиотична резистентност в градска водна среда, което добавя ново измерение към традиционните оценки на качеството на водите (Тодорова и др., 2024). Това е особено актуално и касае не само интегритета на водните екосистеми, но и здравето на хората, доколкото санитарният риск, екологичният риск и рискът за общественото здраве все по-силно се преплитат.

Особено показателна за въздействието на урбанизацията върху малките градски реки е р. Перловска. Реката преминава през едни от най-силно урбанизираните части на София и в значителна степен е коригирана, облицована и хидротехнически трансформирана. В различни участъци естествената крайречна растителност е силно редуцирана, а руслото изпълнява предимно отводнителни функции. Литературните данни и институционалните наблюдения показват, че Перловска река е подложена на сериозен натиск от дъждовно-отточни води, замърсяване от

транспортната инфраструктура и локални зауствания. Наличието на значителни непропускливи повърхности в нейния водосбор благоприятства формирането на бързи и интензивни оттоци при валежни събития, което усилва ерозионните процеси и преноса на замърсители (Министерство на околната среда и водите, 2024).

Река Владайска е сред най-изследваните градски реки в София и представлява особено важен пример за пространствено определяне на екологичния натиск (Министерство на регионалното развитие и благоустройството & Софияплан, 2021; Басейнова дирекция „Дунавски район“ - План за управление на речните басейни 2016–2021, 2016). Публикуваните изследвания показват, че горните участъци на реката, разположени извън силно урбанизираната територия, се характеризират с по-добри физикохимични показатели и по-висок потенциал за самопречистване. След навлизането на реката в централната градска част обаче се наблюдава отчетливо, повишени стойности на биогенни елементи, органично натоварване, влошаване на качеството на водата и по-висок екологичен риск. Допълнителни изследвания върху динамиката на разтворения кислород във Владайска река показват чувствителност на кислородния режим към температурните условия, БПК5 и ХПК, което е типична характеристика за урбанизирани речни системи (Басейнова дирекция „Дунавски район“, 2013).

Боянска река и Драгалевска река, извиращи от северните склонове на Витоша, показват по-различен тип взаимодействие между урбанизация и речна среда. В горните си участъци тези реки запазват относително естествен характер и по-добро екологично състояние, благодарение на горския водосбор и по-ниската степен на антропогенна трансформация. С навлизането им в София обаче се наблюдава постепенно засилване на натиска, свързан със застрояване, корекции на коритата, ограничаване на крайречните зони и увеличен повърхностен отток. Особено чувствителни са участъците в близост до интензивно разширяващите се жилищни зони в подножието на Витоша, където урбанизационният натиск през последните десетилетия значително нараства (Софияплан, 2021).

Река Суходолска е пример за силно повлияна малка градска река, преминаваща през индустриални и периферно урбанизирани части на столицата. При нея се наблюдават хидроморфологични изменения, ограничени крайречни буфери и чувствителност към замърсяване от урбанизирани територии и транспортна инфраструктура. Макар да е по-слабо представена в научната литература в сравнение с Владайска и Искър, наличните данни и теренни наблюдения показват, че реката изпитва типичните за урбанизирана среда проблеми – повишено съдържание на суспендирани вещества, локално органично натоварване и нарушена екологична свързаност (Софияплан, 2021).

На този фон р. Искър има по-различен характер поради значително по-големия си воден обем и басейнов мащаб. Въпреки това и при нея се регистрират признаци на урбанизационен натиск в рамките на Столична община, включително нутриентно замърсяване и локални изменения в екологичното състояние. В сравнение с малките градски реки обаче Искър притежава по-висок разредителен капацитет и по-голяма пространствена устойчивост към краткотрайни замърсявания, което обяснява защо негативните ефекти често се проявяват по-силно именно при по-малките софийски реки.

Институционалният интерес към градските реки на София се засилва и на политическо ниво. Министерството на околната среда и водите съобщи през 2024 г., че разширен мониторинг в града показва пространствено разграничаване между по-чисти и по-силно замърсени участъци, като са идентифицирани конкретни зони, в които трябва да се търсят причините за замърсяване (МОСВ, 2024а, 24 февруари). Макар подобни съобщения да не заменят научното изследване, те са важен индикатор, че проблемът е признат институционално и че има предпоставки за по-системен мониторинг и последващи мерки от страна на оторизираните институции.

В по-широк басейнов контекст анализите за Искърския басейн и за Дунавския район подчертават значението на дифузното замърсяване, недостатъчното пречистване на отпадъчни води и хидроморфологичните изменения като съществени натиски върху повърхностните води (WWF Bulgaria, 2022; Басейнова дирекция „Дунавски район“, 2022-2027). В този смисъл наблюдаваните в София проблеми не са изолирани, а се вписват в по-широката картина на предизвикателствата пред управлението на речните басейни.

Ключовият извод от направения преглед е, че въздействието на урбанизацията върху речните екосистеми не може да се обясни чрез един-единствен фактор. Хидроморфологичните промени, ускореният отток, химичното натоварване, седиментното замърсяване и загубата на крайречни буфери се наслагват и взаимно усилват. Именно поради този кумулативен ефект речните екосистеми в градска среда често реагират по-чувствително на натоварване, отколкото би се очаквало от отделното действие на всеки фактор. Например коригираното русло не само намалява хабитатното разнообразие, но и улеснява по-бързото пренасяне на замърсители; липсата на крайречна растителност не само влошава микроклимата, но и намалява филтрацията на повърхностния отток; натрупаните утайки не само влошават дънната среда, но и действат като вторичен източник на токсични вещества.

Този интегрален характер на проблема изисква и холистичен подход в управлението на водите. В литературата за възстановяване на градски реки все по-често се подчертава, че „сивите“ инженерни решения, насочени единствено към хидравлична ефективност, не са достатъчни и

понякога дори задълбочават екологичните проблеми (Chen et al., 2023; D'Orey et al., 2023). Алтернативата е комбинация от природосъобразни решения: локално задържане и инфилтрация на дъждовни води, зелени покриви, биофилтрационни системи, възстановяване на крайречна растителност, екологизиране на коригираните русла и връщане на пространствена ширина на речните коридори там, където е възможно.

За София подобен подход е от съществено значение, защото градът има значителен потенциал за реализиране на екологични и социални ползи от възстановяването на речните пространства. Градските реки могат да функционират не само като отводнителни канали, а и като зелени коридори, подобряващи микроклимата, свързаността на местообитанията и качеството на градската среда. За да се осъществи този потенциал, е необходимо по-добро съгласуване между управлението на водите, устройственото планиране и политиките за адаптиране към климатичните промени.

От съществено значение е и качеството на последващия контрол. Насоките по Рамковата директива за водите подчертават, че програмите за мониторинг трябва да позволяват едновременно оценка на състоянието и диагностика на причините за влошаване (CIS Guidance No. 7, 2003). При градските реки това предполага експертно пространствено разпределение на пунктовете, включване на епизодични измервания при валежи, анализ на седименти и при възможност - наблюдение на нововъзникващи замърсители и микробиологични индикатори. Само така може да се избегне подценяването на дифузния и краткотраен, но екологично значим натиск.

Ключовият извод от направения преглед е, че въздействието на урбанизацията върху речните екосистеми не може да се обясни чрез един-единствен фактор. Хидроморфологичните промени, ускореният отток, химичното натоварване, седиментното замърсяване и загубата на крайречни буфери се наслагват и взаимно усилват. Именно поради тази кумулативност речните екосистеми в градска среда често реагират по-рязко, отколкото би се очаквало от отделното действие на всеки фактор. Например коригираното русло не само намалява хабитатното разнообразие, но и улеснява по-бързото пренасяне на замърсители; липсата на крайречна растителност не само влошава микроклимата, но и намалява филтрацията на повърхностния отток; натрупаните утайки не само влошават дънната среда, но и действат като вторичен източник на токсични вещества.

Този интегрален характер на проблема изисква и подобен подход към управлението. В литературата за възстановяване на градски реки все по-често се подчертава, че „сивите" инженерни решения, насочени единствено към хидравлична ефективност, не са достатъчни и понякога дори задълбочават екологичните проблеми (Chen et al., 2023; D'Orey et al., 2023). Алтернативата е комбинация от природосъобразни решения: локално задържане и инфилтрация на дъждовни води, зелени покриви, биофилтрационни системи, възстановяване на крайречна растителност,

екологизиране на коригираните русла и връщане на пространствена ширина на речните коридори там, където е възможно.

За София такъв подход е особено приложим, защото градът има потенциал да има екологични и социални ползи от възстановяването на речните пространства. Градските реки могат да функционират не само като отводнителни канали, а и като зелени коридори, подобряващи микроклимата, свързаността на местообитанията и качеството на градската среда. За да се осъществи този потенциал, е необходимо по-добро съгласуване между управлението на водите, устройственото планиране и политиките за адаптация към климатичните промени.

От съществено значение е и качеството на проследяването. Насоките по Рамковата директива за водите подчертават, че програмите за мониторинг трябва да позволяват едновременно оценка на състоянието и диагностика на причините за влошаване (CIS Guidance No. 7, 2003). При градските реки това предполага по-фино пространствено разпределение на пунктовете, включване на епизодични измервания при валежи, анализ на седименти и при възможност - наблюдение на нововъзникващи замърсители и микробиологични индикатори. Само така може да се избегне подценяването на дифузния и краткотраен, но екологично значим натиск.

5. Заключение

Урбанизацията оказва съществено негативно и разностранно въздействие върху речните екосистеми. В условията на голям град като София това въздействие се проявява чрез хидроморфологични изменения на коритата, засилен повърхностен отток, постъпване на отпадъчни и дъждовно-отточни води, натрупване на замърсени утайки и редуциране на естествените крайречни зони. Съвместното действие на тези фактори води до нарушаване на местообитанията, сзагуба на биоразнообразие, влошаване на качеството на водата и отслабване на екосистемните функции.

София представлява показателен пример за небалансирано взаимодействие между градското развитие и устойчиво управление на речните екосистеми. Наличните научни публикации и институционални наблюдения показват, че натискът не е равномерно разпределен, а се проявява в отделни реки и участъци. Това налага както по-прецизен мониторинг, така и приоритизиране на мерките според локалните източници на натиск.

Обзорната информация, представена в статията, може да послужи като основа за бъдещи задълбочени научни изследвания върху градските реки на София – включително върху биоиндикаторни водни съобщества, седименти, и физикохимични характеристики на водната среда, химични замърсители. Посоченото би довело до устойчиво управление на градските реки , което ще

доведе до екологосъобразен подход при управлението на реките, преминаващи през урбанизирани територии.

Използвана литература:

Alfee, S. L., Akter, T., Islam, M. S., Islam, M. R., Poddar, P., Chapman, P. M., & Pal, S. (2025). A global review of river sediment contamination and ecological risk: A systematic review (2015-2023). Journal of Freshwater Ecology, 40(1), 1-31.

Booth, D. B., Roy, A. H., Smith, B., & Capps, K. A. (2016). Global perspectives on the urban stream syndrome. Freshwater Science, 35(1), 412-420.

Buffagni, A., Erba, S., Cazzola, M., Kemp, J., Murray-Bligh, J., & Soszka, H. (2002). STAR guidance for the assessment of hydromorphological features and river quality. STAR Project.

Chen, Y., Lo, K. K., & Fung, T. (2023). Urban river restoration in Hong Kong: Assessment, impacts and societal perceptions. Sustainable Cities and Society, 99, 104885.

CIS Guidance No. 4. (2003). Identification and designation of heavily modified and artificial water bodies. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive.

CIS Guidance No. 7. (2003). Monitoring under the Water Framework Directive. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive.

Наредба № 4/2012 за характеризиране на повърхностните води. Държавен вестник, бр. 22, 2013.

Закон за водите (Обн., ДВ, бр. 67 от 27.07.1999 г., изм. и доп., бр. 54 от 4.07.2025 г.

Cojoc, L. C., de Castro-Català, N., González, J., Kuzmanovic, M., Barceló, D., & Petrovic, M. (2024). Pollutants in urban runoff: Scientific evidence on toxicity and impacts on freshwater ecosystems. Chemosphere, 369, 143806.

Басейнова дирекция „Дунавски район“. (2022–2027). Междинен преглед на значимите проблеми при управлението на водите в Дунавския район за басейново управление.

D’Orey, A., Ferreira, C. S. S., Azevedo, J. C. R., & Vieira, A. A. B. (2023). A review of urban river restoration projects: Practices and challenges. Urban Water Journal, 20(7), 1-15.

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy.

European Commission. (n.d.-a). Urban wastewater. Directorate-General for Environment.

European Commission. (n.d.-b). Water Framework Directive. Directorate-General for Environment.

European Environment Agency. (2024). Chemicals in European surface water and groundwater bodies.

European Environment Agency. (2025). Ecological status of surface waters in Europe.

Hossain, M. M., Rahman, M. S., Islam, M. A., Hasan, M. M., & others. (2024). A review of potentially toxic elements in sediment, water and aquatic biota: Implications for river ecosystems. Toxics, 13(1), 26.

Фикова, Р., Е. Варадинова, Л. Якимов, Л. Кендеров. 2019. Съвременно екологично състояние на лотичните екосистеми във витошките резервати („Торфено бранище“ и „Бистришко бранище“). Ecologia Balkanica, Специално издание 2, 9-14.

Hwang, H.-M., Fiala, M. J., Park, D., & Wade, T. L. (2016). Review of pollutants in urban road dust and stormwater runoff: Part 1. Heavy metals released from vehicles. International Journal of Urban Sciences, 20(3), 334-360.

Марчева, З., Матев, А., и колектив. (2024). Сезонна вариация на разтворения кислород в речни води в урбанизирана територия: Пример с река Владайска. Преглед на Българското геоложко дружество, 85(2), 57-63.

McGrane, S. J. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: A review. Hydrological Sciences Journal, 61(13), 2295-2311.

МОСВ, 2024а, 24 февруари.

Радева, К. (2025). Оценка на качеството на повърхностните води в силно урбанизирани територии: Казусът на река Владайска, София. Geographica Pannonica, 29(1), 12-25.

Regulation N4/2012 for characterization of the superficial waters. State Gazette, № 22, 2013.

Стефанова, В., Бенкова, С., Личева, П., & Маринов, В. (2021). Екологична оценка на водите на река Искър в района на Столична община София, България. Scientific Publications, 29, 473-478.

Тодорова, Й., Топалова, Й., Белоухова, М., Кендеров, Л., и колектив. (2024). Микробно замърсяване на три реки, преминаващи през град София. Ecological Engineering and Environment Protection, 1, 24-34.

Walsh, C. J., Roy, A. H., Feminella, J. W., Cottingham, P. D., Groffman, P. M., & Morgan, R. P. (2005). The urban stream syndrome: Current knowledge and the search for a cure. Journal of the North American Benthological Society, 24(3), 706-723.

WWF Bulgaria. (2022). Analysis of water-related risks in the Iskar River basin.

Министерство на околната среда и водите. (2024). Подходи при възстановяване на градските реки.

Басейнова дирекция „Дунавски район“. (2013). Състояние на повърхностните води на територията на БДДР.

Министерство на регионалното развитие и благоустройството & Софияплан, 2021.

Басейнова дирекция „Дунавски район“ - План за управление на речните басейни 2016–2021. (2016).

Софияплан. (2021). Профил на Столична община: Природна среда и водни системи.

ОПАЗВАНЕ НА АТМОСФЕРНИЯ ВЪЗДУХ В БЛАГОЕВГРАД: НОРМАТИВНА РАМКА, РЕГИОНАЛНИ ПОЛИТИКИ И ТЕНДЕНЦИИ В КАЧЕСТВОТО НА ВЪЗДУХА

Александър Гошев[a], Красимир Стоянов[b], Емилия Варадинова[a]

[a] Югозападен университет „Неофит Рилски“, ул. И. Михайлов № 66, Благоевград 2700, България
[b] Институт за изследвания на климата, атмосферата и водите – БАН, бул. „Цариградско шосе“, №66, 1784, София, България

РЕЗЮМЕ

Качеството на атмосферния въздух в община Благоевград е предмет на трайно обществено и институционално внимание, поради честите превишения на нормативните стойности на фини прахови частици ($ФПЧ_{10}$) в миналото. Управлението на качеството на атмосферния въздух се осъществява в рамките на националната нормативна уредба, регламентирана от Закона за чистотата на атмосферния въздух и подзаконовите актове. Общината е класифицирана като зона с превишения по показателя $ФПЧ_{10}$ в рамките на РОУКАВ „Югозападен“ и разполага с една автоматична измервателна станция, част от националната система за мониторинг. Анализът на данните от мониторинга показват, че основните източници на замърсяване са битовото отопление и автомобилният транспорт, като неблагоприятните топографски и климатични условия ограничават разсейването на замърсителите. През последните години се наблюдава устойчива тенденция към намаляване на броя на превишенията на средноденонощната норма за $ФПЧ_{10}$, макар че, през зимния сезон в условия на температурни инверсии и безветрие се запазва рискът от епизодично влошаване на качеството на въздуха.

КЛЮЧОВИ ДУМИ: качество на атмосферния въздух, замърсители, фини прахови частици, община Благоевград, Национална система за мониторинг на околната среда

AIR PROTECTION IN BLAGOEVGRAD: REGULATORY FRAMEWORK, REGIONAL POLICIES AND AIR QUALITY TRENDS

Aleksandar Goshev[a], Krasimir Stoyanov[b], Emilia Varadinova[a]

[a] South-West University "Neofit Rilski", Blagoevgrad, Bulgaria

[b]*Institute of Climate, Atmosphere and Water Research – Bulgarian Academy of Sciences (BAS), 66 Tsarigradsko Shose Blvd., 1784 Sofia, Bulgaria*

ABSTRACT

The air quality in the municipality of Blagoevgrad is a subject of constant public and institutional attention, mainly due to the frequent exceedances of the fine particulate matter (PM_{10}) standards in the past. The management of the air quality is carried out in accordance with the national regulatory framework, regulated by the Clean Air Act and the relevant by-laws - ordinances. The municipality was classified as an area with exceedances of the PM_{10} values within the Southwestern Air Quality Management Region. There is one automatic measuring station on the territory of the Blagoevgrad, as a part of the national monitoring air system. The analysis of the monitoring data shows that the main sources of air pollution are domestic heating and transport, in combination with unfavorable topographic and climatic conditions which limit the dispersion of pollutants. During the recent years, a steady trend towards a decrease in the number of exceedances of the average daily standards of PM_{10} has been observed, although during the winter season, in conditions of temperature inversions and calm weather, the risk of episodic deterioration of air quality remains.

KEYWORDS: air quality, pollutants, fine particulate matter, PM10, Blagoevgrad Municipality, National Environmental Monitoring System

1. Актуалност на темата

Опазването на чистотата на въздуха е основен приоритет в съвременните екологични политики, като качеството му е пряко свързано с общественото здраве и икономическото развитие. Институциите следят нивата на замърсяване в реално време, за да ограничат вредното въздействие върху населението.

В световен мащаб, замърсяването на въздуха е водещ рисков фактор за общественото здраве и е свързано със значителни здравни, икономически и социални разходи.

Замърсяването на въздуха е причина за милиони смъртни случаи по света всяка година и за редица заболявания, като белодробни заболявания, респираторни инфекции на горните дихателни пътища и бронхити. Най-уязвими на комбинираното въздействие на атмосферните замърсители са хронично болните от бронхиална астма и от сърдечно-съдови заболявания. Според Института за здравни ефекти (Health Effects Institute), само през 2019 г. излагането на замърсен въздуха е допринесло за 6,67 милиона смъртни случая, което е почти 12% от общите смъртни случаи в

световен мащаб и е тежест на заболеваемостта, надмината само от високо кръвно налягане, употреба на тютюн и нездравословното хранене.

Замърсяването на въздуха е основен екологичен проблем в България. Страната ни продължава да регистрира нива на фини прахови частици (ФПЧ$_{10}$ и ФПЧ$_{2.5}$) и бензо(а)пирен над европейските норми, което я поставя сред държавите с най-висок риск за общественото здраве. Общият брой смъртни случаи, дължащи се на общо замърсяване на въздуха през 2023 г. в България, е 11 118. Изчислените общи загуби на благосъстояние (поради ФПЧ$_{2.5}$ и озон) в България са приблизително 6 млд. евро през 2017 г., което представлява 13% от брутния вътрешен продукт на страната (OECD, 2020).

Присъединяването на страната ни към Европейския съюз през 2007 г. и нарасналата обществена осведоменост доведе до лесен достъп до данни за качеството на въздуха и здравна информация. Все повече са платформите за споделяне на данни за въздуха особено в големите градове и това дава възможност на обществеността да се информира и да изисква по-добро качество на въздуха. (ЛМКАВ). Според националните доклади за състоянието и опазването на околната среда в Република България, след 2015 г. се наблюдават положителни тенденции в качеството на въздуха, като се регистрира намаляване на нивата на основните замърсители в цялата страна. Ефектите от замърсяването на въздуха се усещат най-силно в градските райони, където хората изпитват значителни здравословни проблеми. (Изпълнителна агенция по околната среда (ИАОС)). Сред основните антропогенни източници на замърсяване на въздуха са битовото отопление, автомобилния транспорт, селското стопанство, производството на електрическа и топлинна енергия и промишлеността. Разбирането за въздействието на замърсени въздух върху човешкото здраве и околната среда е в основата на европейските и национални политики в този сектор.

Средногодишните нива на ФПЧ$_{2.5}$ в България през 2019 г. са 19.4 μg/m^3 (UI: 18.3 – 20.5 μg/m^3), което като цяло съответства с изчисленията на Европейската агенция за околна среда (ЕАОС) и Световната здравна организация (СЗО) (Институт за здравни ефекти (HEI) (2022)). Въпреки че нивата на ФПЧ$_{2.5}$ в България са по-ниски от граничната стойност на ФПЧ$_{2.5}$ за качество на въздуха в ЕС от 25 μg/m^3, те остават по-високи от годишната препоръка на СЗО от 5 μg/m^3, както и от средната концентрация на ФПЧ$_{2.5}$ в Европейския съюз. Тези данни показват, че цялото население на България живее в райони, в които нивата на ФПЧ$_{2.5}$ надвишават текущите годишни препоръки на СЗО (5 μg/m^3); по-голяма част от населението (88%) също така живее в райони, които надхвърлят третата междинна цел (15 μg/m^3) (фигура 1).



Фигура 1 – Уязвимост на населението на България на нивата на ФПЧ$_{2.5}$, 2019 г.

Източник: (HEI) 2022 г.

2. Методи и цел на изследването

За целите на настоящия доклад са използвани данни от АИС – Благоевград, част от Националната система за мониторинг на качеството на атмосферния въздух и публикувани от ИАОС. Анализирани са средноденонощни и средногодишни концентрации на ФПЧ$_{10}$ и бензо(а)пирен за периода 2007-2025 г. Използвани са сравнителен анализ, графичен анализ и анализ на тенденциите за да се отличат причините за замърсяване и факторите, които влияят върху нивата на замърсителите. Докладът разглежда състоянието на въздуха в Благоевград като очертава нормативната рамка, акцентира върху климатичните особености на района и представя регионалните политики и тенденциите в качеството на въздуха Отговорът на въпроса „До каква степен променящите се природни и антропогенни фактори, и политиките на местната власт определят общото подобрение в качеството на въздуха“ остава отворен и е предмет на по-нататъшно изследване от страна на автора.

3. Основни атмосферни замърсители

ЕАОС определя замърсяването на въздуха като наличие на някои вещества в атмосферата на равнища, които оказват вредно въздействие върху здравето на човека, околната среда и културното наследство (сгради, паметници и материали). Вредните вещества могат да се разделят на две категории – първични и вторични замърсители. Първичните замърсители постъпват в атмосферата от комин, друго изпускащо устройство или се емитират неорганизирано. Вторичните замърсители се формират в атмосферата в резултат на окисление и трансформация на първичните газови емисии. Основните замърсители на атмосферния въздух са:

- ✓ Фини прахови частици (ФПЧ/PM).

Основни източници на прах са промишлеността, транспорта и енергетиката. Тук се включват прах, сажди и течни частици, като ФПЧ$_{10}$ и ФПЧ$_{2.5}$ с размери съответно под 10 μm и под 2.5 μm са особено опасни. Праховите частици могат да бъдат съставени от различни химични компоненти. Въздействието им върху човешкото здраве и околната среда зависи от състава им. Някои тежки метали, като арсен, кадмий, живак и никел, могат също да бъдат намерени в праховите частици**.** Прахът постъпва в организма предимно чрез дихателната система, при което по-едрите частици се задържат в горните дихателни пътища, а по-финитe частици (под 10 μm - ФПЧ$_{10}$) достигат до по-ниските отдели на дихателната система, като водят до увреждане на тъканите в белия дроб. Деца, възрастни и хора с хронични белодробни заболявания, грип или астма са особено чувствителни към високи стойности на ФПЧ$_{10}$. Вредният ефект на замърсяването с прах е по-силно изразен при едновременно присъствие на серен диоксид в атмосферния въздух. Най-уязвими на комбинираното въздействие на праха и серния диоксид са хронично болните от бронхиална астма и от сърдечно-съдови заболявания. (ИАОС, НЦОЗА, 2022)

- ✓ Азотни оксиди (NOX)

Азотният диоксид (NO2) произтича от горивни процеси. Отделя се главно от моторните превозни средства (МПС), топлоелектрическите централи (ТЕЦ) и някои промишлени предприятия. Причинява смог и киселинни дъждове. Под въздействието на интензивна слънчева светлина и в присъствие на летливи органични съединения в атмосферния въздух азотният диоксид взаимодейства химически, в резултат на което се образува вторичният замърсител - озон. NO_2 постъпва в човешкия организъм чрез дишането, като голяма част от него се абсорбира, а друга може да се задържи дълго време в белия дроб. Продължително въздействие на концентрации над пределно допустимите може да причини структурни промени в белия дроб. Вредното въздействие на този замърсител се отразява предимно върху дихателните функции. (ИАОС, НЦОЗА, 2022)

- ✓ Серен диоксид (SO_2)

SO_2 спада към групата на серните оксиди (SO_x), които се формират при изгаряне на твърди и течни горива с високо сярно съдържание. Основните източник, който генерира серен диоксид е изгарянето на природни горива (ТЕЦ, битови източници). Металургията и химическата промишленост също са източник на замърсяване със серен диоксид. SO_2 и NO_x са основни компоненти на "киселите дъждове". При високи концентрации абсорбцията му достига до 90 % в горните дихателни пътища и в по-малка степен в по-ниските отдели на дихателната система. Действието на SO_2 върху дихателната система като правило се съчетава с влиянието на праха. Чувствителни групи от населението към експозиция на серен диоксид са децата, възрастните, хората

с астма, със сърдечно-съдови заболявания или хронични белодробни заболявания. (ИАОС, НЦОЗА, 2022)

- ✓ Приземен озон (O_3):

Приземният (тропосферен) озон (O_3) се образува при химични реакции (задействани от слънчевата светлина) на прекурсорни замърсители, изпускани във въздуха, включително тези от транспорта, извличането на природен газ, депата за отпадъци и химикалите в домакинството. Попаднал в човешкото тяло, озонът причинява възпаление на белите дробове и бронхите, което води до учестен сърдечен ритъм. При хора, които вече страдат от сърдечносъдови или респираторни заболявания, като астма, периодите с високи концентрации на озон могат да доведат до инвалидизиране или дори до смърт. (ИАОС, НЦОЗА, 2022)

- ✓ Тежки метали и полиароматните полициклични ароматни въглеводороди (ПАВ):

ПАВ са голяма група органични съединения с две или повече бензолни ядра. Те се образуват в най-голяма степен при горивните процеси, главно при непълно горене на дърва, въглища и дизелово гориво,производството на кокс и стомана, пътния трафик, от двигателите с вътрешно горене и горските пожари. Съществуват няколко стотин ПАВ. Контролът на ПАВ в атмосферния въздух се определя чрез бензо(а)пирен, който се изолира в проби от $ФПЧ_{10}$.

Бензо[а]пирен (C_2OH_{12}) е изключително токсичен полицикличен ароматен въглеводород (ПАВ), известен като силен канцероген и мутаген от I клас на опасност. Образува се при непълно изгаряне на органични материали (тютюнев дим, изгорели газове, пушени храни). Той е устойчив замърсител на околната среда, попадащ в почвата, водата и въздуха. (ИАОС, НЦОЗА, 2022)

- ✓ Въглероден оксид (CO)

(CO) е газ без цвят, без мирис, малко по-лек от въздуха, горящ газ. Представлява един от най-широко разпространените атмосферни замърсители, който се образува при непълното горене на въглеродсъдържащи материали. Често е наричан "тих убиец", тъй като човешките сетива не могат да го засекат, а вдишването му е животозастрашаващо. Най-голям източник на CO е автомобилният транспорт - над 65 % от общото емитирано количество за страната (ИАОС, НЦОЗА, 2022)

- ✓ Летливи органични съединения (ЛОС)

ЛОС са газообразни химикали, съдържащи въглерод, които лесно се изпаряват при стайна температура. Те се отделят при непълното изгаряне на горивата, както и с изпаренията при дейности, свързани с презареждане (бензин) и боядисване (органични разтворители) на моторни превозни средства, при дейности с битови продукти (бои, лакове, лепила) и индустриални процеси (ИАОС).

Нормите за основните замърсители на въздуха са определени от европейското и националното законодателство. Основен проблем за качеството на атмосферния въздух в страната е замърсяването

с ФПЧ. Емисиите на $ФПЧ_{10}$ се отделят основно при изгарянето на твърди горива за отопление в домакинствата. Емисиите в съчетание с неблагоприятните метеорологични условия (температурна инверсия, мъгла и безветрие) способстват за задържането и натрупването на ФПЧ в ниския приземен слой. Наличието на валежи и вятър способства за разсейване на праховите частици и води до естественото самопречистване на въздуха.

4. Европейски регулации

Европейското законодателство в областта на КАВ е основната нормативна рамка, която определя допустимите норми на замърсители, изпълняваните политики и задължава държавите членки да следят и подобряват чистотата на въздуха.

Основните Европейски директиви в областта на управлението на въздуха са:

- ✓ Директива 2008/50/ЕО

Тя определя правила за подобряване на качеството на въздуха в Европа и премахване на вредните последици за човешкото здраве и околната среда до 2050 г. Директивата напълно отменя и заменя другите действащи до този момент директиви в областта на опазването на въздуха, като обединява предишното законодателство в единна рамка. През ноември 2024 г. беше приета новата ревизирана Директива (ЕС) 2024/2881, която влиза в пълна сила от 12 декември 2026 г.

- ✓ Директива 2004/107/ЕО

Директивата е определя целеви стойности и изисквания за мониторинг на опасни токсични вещества и канцерогени в атмосферния въздух, с цел защита на човешкото здраве и околната среда. Задава максимално допустими концентрации на тежки метали и органични съединения в атмосферния въздух, които трябва да бъдат постигнати, както и общи методи и критерии, по които държавите членки да оценяват нивата на тези замърсители в атмосферата. Директивата изисква поддържане на постоянни пунктове за измерване, особено в зони и агломерации, където нивата на замърсителите надвишават определени прагове и задължава държавите да гарантират достъп до ясна, точна и публично достъпна информация за гражданите.

5. Национална законодателна рамка

Националното тематично законодателство в областта на чистотата на въздуха включва следните нормативни регулации:

- ✓ Национална програма за намаляване на общите годишни емисии на серен диоксид, азотни оксиди, летливи органични съединения и амоняк в атмосферния въздух;
- ✓ Национална програма за подобряване качеството на атмосферния въздух (2018 – 2024г.);

- ✓ Актуализирана Национална програма за контрол на замърсяването на въздуха 2020 – 2030 г.;
- ✓ Закон за опазване на околната среда;
- ✓ Закон за чистотата на атмосферния въздух;
- ✓ Наредба № 7 от 3.05.1999 г. за оценка и управление качеството на атмосферния въздух;
- ✓ Наредба № 11 от 14.05.2007 г. за норми за арсен, кадмий, живак, никел и полициклични ароматни въглеводороди в атмосферния въздух;
- ✓ Наредба № 12 от 15.07.2010 г. за норми за серен диоксид, азотен диоксид, фини прахови частици, олово, бензен, въглероден оксид и озон в атмосферния въздух;
- ✓ Наредба № 14 от 23.09.1997 г. за норми за пределно допустимите концентрации на вредни вещества в атмосферния въздух на населените места.

5.1 Пределно допустими концентрации на основни атмосферни замърсители

В наредба № 12 от 15 юли 2010 г. за норми за серен диоксид, азотен диоксид, фини прахови частици, олово, бензен, въглероден оксид и озон в атмосферния въздух, са посочени нормите и стойностите на основните замърсители на атмосферния въздух в България (таблица 1).

Таблица 1 – Пределно допустими концентрации на основните замърсители на въздуха. Източник: Законодателство МОСВ

ПОКАЗАТЕЛ:	**НОРМА:**	**СТОЙНОСТ:**
ФПЧ$_{10}$	средноденонощна	50 μg/m^3 – да не се превишават повече от 35 пъти за КГ
	средногодишна	40 μg/m^3
ФПЧ$_{2,5}$	средногодишна	25 / 20 μg/m^3
ПАВ / бензо(α)пирен	средногодишна	1ng/m^3
O$_3$	праг за информиране на населението (средно часова стойност)	180 μg/m^3
	Праг за предупреждение на населението (средно часова стойност)	240 мкг/m^3 (измерен през три последователни часа)

	Краткосрочна целева норма - максимална осемчасова стойност в рамките на	120 мкг/ m^3 (да не се превишава повече от 25 пъти в една календарна година, осреднено за тригодишен
SO_2	средночасова	350 µg/ m^3 – да не се превишават повече от 24 пъти за една календарна година /КГ/
	средноденонощна	125 µg/m3 – да не се превишават повече от 3 пъти за КГ
	Алармен праг	500 мкг/ m^3 (измерен през три последователни часа)
NO_2	средночасова	200 µg/ m^3 – да не се превишават повече от 18 пъти за КГ
	средногодишна	40 µg/ m^3
	Алармен праг	400 мкг/m^3 (измерен през три последователни часа)

Заради системни нарушения на определените норми на вредни вещества в атмосферния въздух България е обект на съдебни искове от Европейската комисия, които търпят развитие през годините. Така например, през 2017 г. ЕК стартира дела срещу страната ни пред Съда на ЕС по Директива 2008/50/ЕО. Причината - неспазване на нормите за ФПЧ в София, Пловдив, Варна, Северна, Югозападна и Югоизточна България. България е осъдена да плати съдебните разноски, а ЕК дава нова отсрочка за решаване на проблема.

През 2019 г. срещу България стартира наказателна процедура за липса на ефективни мерки и системно превишаване на пределните норми на серен диоксид в югоизточна България. С решение на ЕК от 11.03.2026 г. е закрита наказателната процедура срещу България за достъпа до правосъдие в областта на КАВ след законодателни промени в ЗЧАВ. В ЗИД на ЗЧАВ, приет от Народното събрание през 2025 г., е предвидена изрична възможност общинските програми за КАВ да бъдат оспорвани по реда на АПК. (МОСВ, 2026)

В началото на 2026 г. ЕК прекрати и производството по отношение на серния диоксид в Югоизточна България, тъй като страната ни отчете трайно спазване на нормите за три последователни години. (ПЕКБ, 2026)

5.2 Национална система за мониторинг на качеството на атмосферния въздух (НСМКАВ)

Националната система за мониторинг на околната среда (НСМОС) се създава и функционира в съответствие на чл. 1, т. 7 от Закона за опазване на околната среда. системата осигурява своевременна и достоверна информация за състоянието на компонентите на околната среда и факторите, въздействащи върху нея. Системата се ръководи от министъра на околната среда и водите чрез ИАОС. ИАОС администрира Национална система за мониторинг на територията на цялата страна като осигурява материално - техническите, методически и програмно-информационните ресурси, необходими за нейното функциониране и развитие. Измерванията и наблюденията се извършват от структурите на ИАОС по унифицирани методи за пробонабиране и анализи при спазване на процедурите за осигуряване на качеството на измерванията и данните. Всички лаборатории на ИАОС са акредитирани по БДС EN ISO/IEC 17025. НСМОС включва националните мрежи за мониторинг на: атмосферен въздух, води , земи и почви, гори и защитени територии, биологично разнообразие, радиологичен мониторинг и мониторинг на шума. В обхвата на НСМОС са и контролно-информационните системи за емисии на вредни вещества в атмосферния въздух, емисии на отпадъчни води във водни обекти, информационна система за отпадъци, информационна система за почвите, информационна система за биологичното разнообразие и автоматизирана система за радиационен гама - фон. Оценките на състоянието на компонентите на околната среда и докладванията на данни на национално ниво се извършват от ИАОС, оценките на регионално ниво - от РИОСВ, оценките и докладванията на състоянието на водните ресурси на басейново ново - от 4 Басейнови дирекции за управление на водите.

Дейността на НСМКАВ се регламентира със Заповед на Министъра на околната среда и водите № РД – 489/26.06.2019 г., в т.ч. брой, вид на пунктовете, контролирани атмосферни замърсители, методи и средства за измерване. Територията на страната е разделена на 6 Района за оценка и управление на качеството на атмосферния въздух, утвърдени със Заповед № 257/25.03.2022 г. на министъра на околната среда и водите. Територията на страната е разделена на следните райони за оценка и управление на качеството на атмосферния въздух (РОУКАВ) - Столичен, Пловдив, Варна, Северен/Дунавски, Югозападен и Югоизточен (фигура 2). Анализът на данните за качеството на атмосферния въздух (КАВ) се извършва по райони, като се отчита и спецификата на всяко населено място, в което се извършва контрол. По оценка от 2010 година над 55 % от населението на страната е засегнато от замърсяването с $ФПЧ_{10}$ (таблица 2).



Фигура 2 – РОУКАВ и пунктове за мониторинг на КАВ

Източник: ИАОС

Таблица 2 – Процент на засегнатото население от нивата на съответните атмосферни замърсители по РОУКАВ и общо за страната през 2010 г.

Източник: Община Благоевград. (2011). Програма за КАВ 2011 г.

РОУКАВ	**SO_2**	**NO_2**	**$ФПЧ_{10}$**	**Озон**
BG0001 ***Столичен***	0	100	100	0
BG0002 ***Пловдив***	0	0	100	0
BG0003 ***Варна***	0	0	100	0
BG0004 ***Северен/Дунавски***	0	0	36	0
BG0005 ***Югозападен***	15	0	27	0
BG0006 ***Южен/Тракийски***	12	0	52	14
Общо за страната	**5.4**	**16**	**55.4**	**3.6**

През 2010 г. в НАСККАВ към Министерство на околната среда и водите (МОСВ) са функционирали 55 стационарни пункта, от тях 11 пункта с ръчно пробонабиране (РП) и последващ лабораторен анализ, 34 автоматични измервателни станции (АИС), 10 ДОАС системи, разположени в градовете Свищов, Никопол, Русе, Силистра, Бургас и Ст. Загора (с. Могила, с. Ръжена, с. Остра

Могила). Пунктовете за мониторинг (ПМ) на качеството на атмосферния въздух са разположени в 34 населени места.

Към момента НСМКАВ на МОСВ се състои от 48 стационарни пункта, в т.ч. 9 пункта с ръчно пробонабиране и последващ лабораторен анализ, 30 автоматични измервателни станции (АИС), 5 автоматични ДОАС системи (работещи на оптичен принцип), както и 4 АИС за мониторинг на качеството на атмосферния въздух в горски екосистеми - КФС "Рожен", „Юндола", „Витиня" и „Ст. Оряхово".

В НСМКАВ ежедневно се контролират концентрациите на фини прахови частици ($ФПЧ_{10}$ и $ФПЧ_{2.5}$), серен диоксид, азотен диоксид/азотни оксиди, въглероден оксид, озон, бензен, олово, кадмий, никел, арсен, ПАВ. Допълнително, според характера и източниците на емисии в отделни райони от територията на страната се контролират специфичните показатели: фенол, амоняк, толуен, ксилен, стирен, серовъглерод, сероводород, метан и неметанови въглеводороди, както и някои други специфични замърсители.

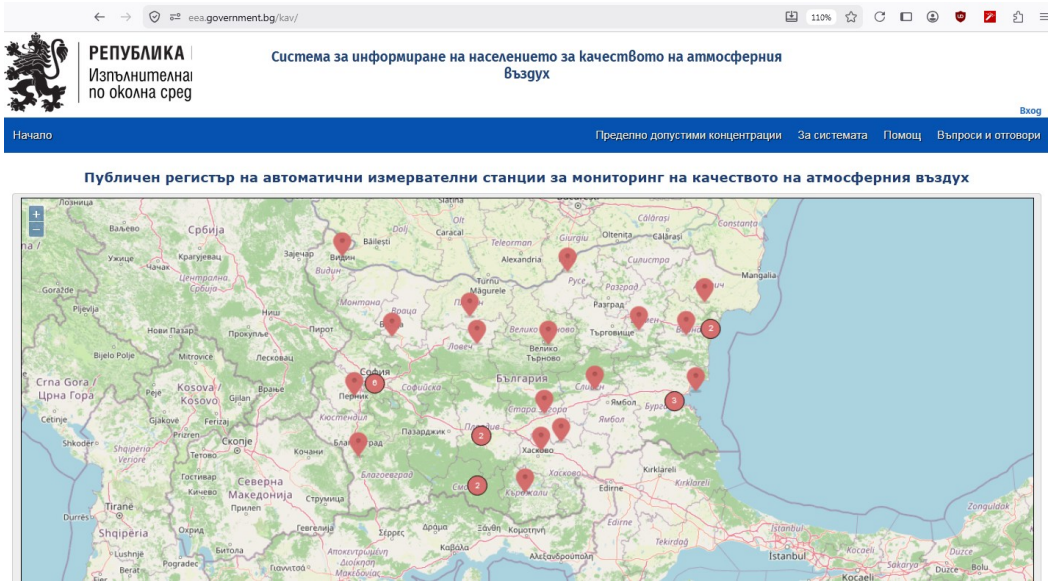
Всички автоматични станции (АИС и ДОАС) работят в непрекъснат режим на работа (24 часа), като данните от тях чрез система за пренос на данни в реално време постъпват в РИОСВ - регионални бази данни и в ИАОС София, където се намира Националната база данни за КАВ. Системата осигурява навременно предоставяне на информацията за качеството на въздуха на обществеността и отговорните институции. Обхванати са дванадесет населени места в България. В София, Бургас, Стара Загора, Казанлък, Русе, Силистра, Никопол и Свищов са изградени публични информационни табла за предоставяне на информация на обществеността в реално време.

Ръчните пунктове за мониторинг на въздуха работят само в светлата част на денонощието (4 пробовземания на ден, 5 дни в седмицата). За изготвяне на оценка на КАВ от ръчните пунктове са включени само данни за регистрираните средночасови концентрации. За тези пунктове не е извършвано сравнение на регистрираните концентрации с денонощните норми на контролираните замърсители, тъй като техния времеви обхват не позволява да се направи точна оценка на нивата на замърсителите в денонощен аспект. Тези данни имат само индикативен характер. Това не се отнася за показателите $ФПЧ_{10}$, олово, кадмий и ПАВ, за които пробовземането е с продължителност 24 часа.

Системата за качеството на атмосферния въздух разполага и с 6 броя мобилни автоматични станции (МАС), включени в регионалните лаборатории в София, Пловдив, Плевен, Стара Загора, Варна и Русе. Станциите са разпределени пропорционално по територията на страната като дават възможност за обслужване на територията на цялата страна. Мобилните автоматични станции се използват за извършване на допълнителни измервания в райони, в които липсват или е ограничен броя на стационарните пунктове, както и при аварийни ситуации, поръчки от държавни и общински

организации, за проследяване ефекта от изпълнението на общинските програми за намаляване нивото на атмосферните замърсители и др. Дейността на МАС ежегодно се регламентира с графици, утвърждавани от министъра на околната среда и водите (ИАОС, НСМКАВ).

В отговор на засиления обществен интерес към качеството и състоянието на въздуха в страната, от 2019 година Изпълнителна агенция по околната среда стартира Система за информиране на населението за качеството на атмосферния въздух. Визуализацията в уеб-платформата се извършва на базата на постъпващите в реално време данни от АИС в рамките на НАСККАВ. (фигура 3)



Фигура 3 – Система за информиране на населението за качеството на атмосферния въздух

Източник: ИАОС, СИНКАВ

6. Състояние на въздуха на територията на Община Благоевград.

6.1 Пункт за мониторинг на КАВ – Благоевград

Пунктът (АИС за КАВ – Благоевград, фигура 4) е част от Националната система за мониторинг на качеството на атмосферния въздух. Въведен е в експлоатация на 01.01.2008 г. и се намира в гр. Благоевград. площадка на НИМХ – Кюстендил в ж.к. „Ален мак“. Класифициран е като градски фонов пункт и с обхват 100 m – 2 km;

Контролираните в пункта показатели са ФПЧ$_{10}$, серен диоксид, азотен диоксид/ азотен оксид, бензен, озон, полициклични ароматни въглеводороди (ПАВ) и стандартен набор от метеорологични елементи (температура и влажност на въздуха, посока и скорост на вятъра, атмосферно налягане и слънчева радиация.

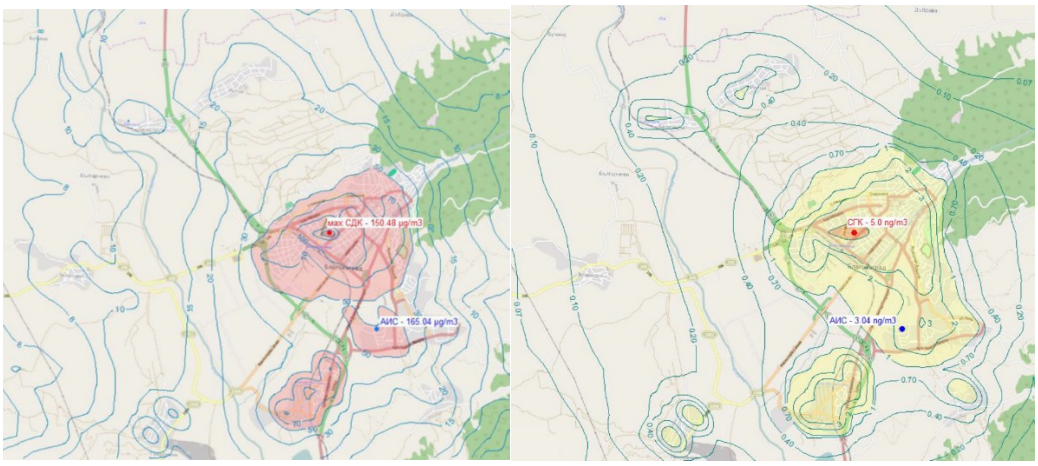


Фигура 4 – Разположение на пункт за мониторинг - Благоевград

Източник: Община Благоевград (2016) Програма за КАВ 2015÷2018 г.

6.2 Замърсяване на въздуха с ФПЧ и ПАВ

През 2007 г. Община Благоевград е класифицирана като „зона Благоевград" в рамките на РОУКАВ „Югозападен", и е с превишение на средноденонощната норма (СДН) с допустимо отклонение по показател „$ФПЧ_{10}$". През 2010 г. това е потвърдено с нова заповед на министъра на околната среда. През 2013 г. – отново потвърдено - територията на община Благоевград попада в район с превишение на нормите по показател фини прахови частици ($ФПЧ_{10}$) и полициклични ароматни въглеводороди (ПАВ). В периода 2016 – 2023 г. община Благоевград остава включена в списъка на РОУКАВ с констатирано замърсяване на атмосферния въздух с фини $ФПЧ_{10}$ и полициклични ароматни въглеводороди (ПАВ). От 2024 г. до момента в АИС за КАВ – Благоевград не регистрира превишения на установените норми на замърсителите (бр. прев. на СДН за $ФПЧ_{10}$ < 35 бр. годишно). На фигура 5 по-долу е показано разпределение на максималната СДК на $ФПЧ_{10}$ и средногодишната концентрация (СГК) на бензо(α)пирен (маркер за определяне на ПАВ), на територията на Община Благоевград – 2014 година.



Фигура 5 – Разпределение на максималната СДК на ФПЧ10 и СГК на бензо(α)пирен, Община Благоевград – 2014 година

Източник: Община Благоевград (2016). Програма за КАВ 2015÷2018 г.

6.3 Програми за намаляване нивата на замърсителите и достигане на съответните норми в Община Благоевград

За установено превишаване на нормите на $ФПЧ_{10}$ и ПАВ в пункт за мониторинг – Благоевград Община Благоевград е включена в списъка на районите за оценка и управление на КАВ, разработва програма за намаляване нивата на замърсителите и план за действие към нея. Разработването, изпълнението, отчитането и контрола върху програмите за намаляване нивата на замърсителите е в съответствие със чл. 79 от Закона за опазване на околната среда, чл. 27 от Закона за чистотата на атмосферния въздух и чл. 31 от Наредба № 7 за оценка и управление качеството на атмосферния въздух. Програмата се разработва от общинската администрация, приема се от Общински съвет и се изпълнява от кмета на общината. РИОСВ - Благоевград съгласува и осъществява контрол по изпълнение на заложените в програмата мерки (краткосрочни и дългосрочни), а кметът на общината изготвя и представя годишен доклад за изпълнение мерките. При неефективност на мерките в програмата и непостигане на предвиденото съответствие с нормите за КАВ, общинската администрация следва да актуализира програмата с нов период на действие.

Историческият преглед на общинската нормативна уредба в областта на управлението и чистотата на атмосферния въздух включва:

- ✓ Програма за намаляване на вредните емисиите в атмосферния въздух на територията на гр. Благоевград и План за действие за периода 2011-2014г., изготвена по показателя $ФПЧ_{10}$;

- ✓ Актуализация на програма за намаляване на вредните емисии в атмосферния въздух на фини прахови частици и полициклични ароматни въглеводороди на територията на Община Благоевград период на действие: 2015 – 2018 година;
- ✓ Актуализирана Програма за качеството на атмосферния въздух на Община Благоевград за периода 2019÷2023г.

6.4 Природни фактори за формирането на високи концентрации на атмосферни замърсители в Благоевград

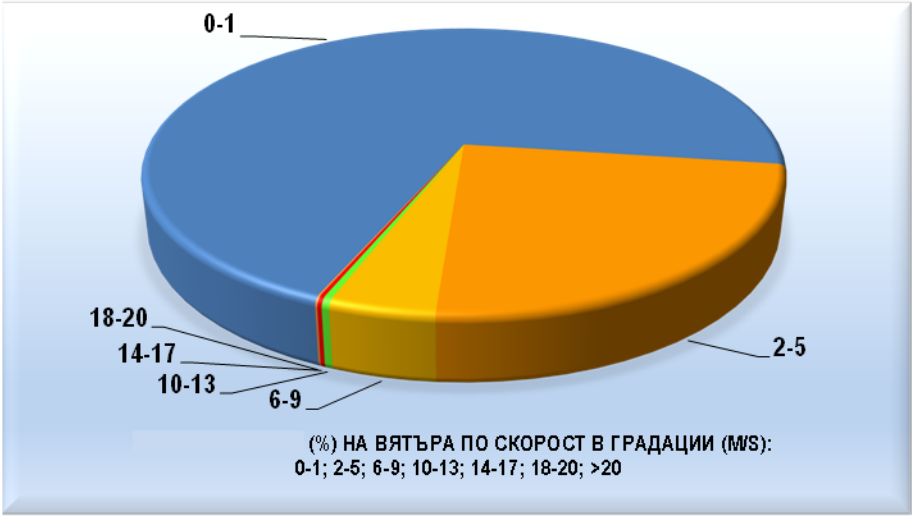
Специфичните климатични и метеорологични условия в региона на Благоевград ограничават дисперсията на местните емисии, което обуславя отчитането на повишени нива на замърсяване. Детайлно изследване на екологичните фактори, компрометиращи качеството на атмосферния въздух (КАВ), е заложено в стратегическите документи на местната администрация — Програма за намаляване на вредните емисии в атмосферния въздух на фини прахови частици и полициклични ароматни въглеводороди на територията на Община Благоевград 2015 – 2018 г., както и в нейната последваща актуализация с период на действие 2019 – 2023 г. В тях е направен цялостен преглед на макроклиматичния режим и циркулационните процеси в Благоевград и прилежащите му територии. Данните сочат, че под влияние на антициклонални барични системи през зимния сезон се засилват проявите на тихо време (липса на вятър) или състояния с ниска скорост на въздушните маси. Това явление правопропорционално увеличава честотата на задържане на ниска облачност и мъгли. В условията на зимен антициклон се генерират термични аномалии с температури под сезонната норма, липса на валежни процеси и трайно застояване на гъсти мъгли, което блокира самоочистването на приземния въздушен слой.

Благоевград обхваща източния сектор на Благоевградската котловина, позициониран в подножието на югозападните разклонения на Рила (между Дъбравския и Делвинския рид). Морфоложките параметри на котловината включват максимално протежение от около 8 km по направление север-юг, ширина от приблизително 4 km и средна височина от около 350 m. Самата градска територия варира в диапазона между 320 и 500 m н.в., със средно равнище около 400 m. Спецификата на релефа, съчетаващ долинно-равнинни елементи и планински склонове, оказва фундаментално въздействие върху локалния климат и аерацията на приземния въздушен слой. Поради котловинния си характер релефът улеснява застояването на студени въздушни маси и генерирането на температурни инверсии. Това води до трайна атмосферна стратификация, слаба циркулация на въздуха и висок дял на дните без вятър (тихо време). При тези условия самоочистващата способност на атмосферата спрямо антропогенните емисии е силно ограничена,

което благоприятства появата на гъсти и продължителни мъгли.Положителен динамичен фактор е надлъжната отвореност на котловината на север и на юг по протежението на река Струма, както и частичното ѝ отваряне по речните долини на нейните притоци в посока изток-запад. Тези географски коридори стимулират появата на локална планинско-долинна циркулация, която е по-осезаема през лятното полугодие. Допълнително предимство е слабият наклон на котловинното дъно, ориентиран от изток на запад, който подпомага естественото гравитационно оттичане на компрометирания градски въздух. С оглед на този дренажен ефект, ситуирането на промишлената зона в западния сектор на градското землище се оценява като урбанистично целесъобразно.

Интензивността на атмосферното замърсяване и потенциалът за самоочистване са в пряка зависимост от няколко взаимно свързани метеорологични фактора. Това са местният ветрови режим, температурните условия заедно с характерната за релефа устойчива вертикална стратификация, както и комплексът от валежно-влажностни показатели.

Средногодишната **скорост на вятъра** в Благоевград е възлиза на 2,6 m/s. В рамките на годишния ход най-високи средномесечни скорости от 2,8–2,9 m/s се отчитат през март, април и юни, докато минималните нива от 2,4 m/s са характерни за месец октомври. Най-висок относителен дял през годината имат слабите ветрове със скорост под 1,9 m/s. Те представляват 71% от всички случаи с вятър На следващо място, с 24% от случаите, са ветровете в диапазона от 2 до 5,9 m/s, а по-интензивните преноси със скорост над 6 m/s имат незначително присъствие от едва около 5% от всички случаи с вятър. (фигура 6). Същевременно регионът се отличава със значителна честота на антициклонални състояния, като делът на тихото време (безветрие) достига високи стойности от около 43%.

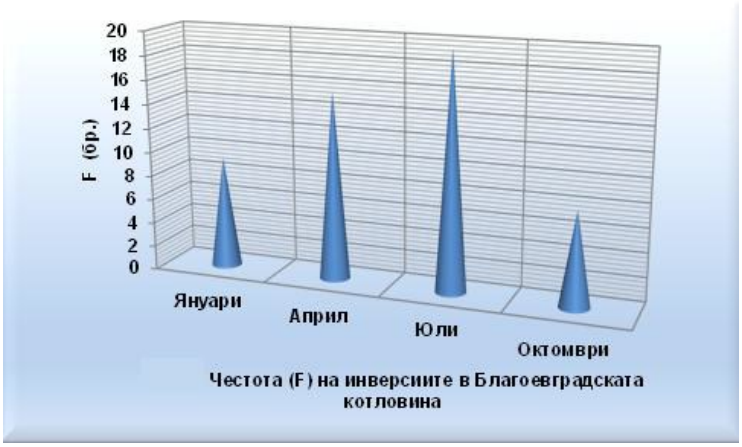


Фигура 6 – Честота на средната скорост на вятъра в Благоевград в % (от всички случаи, вкл. тихо време)

Източник: Община Благоевград. (2018). Актуализирана Програма за КАВ за периода 2019÷2023 г.

Температурата на въздуха е критичен фактор за атмосферното замърсяване. При високи стойности на температурата нараства химичната реактивност на въздушната среда – много от замърсителите стават по-реактивни, при което възникват и нови химични съединения, често още по-агресивни по отношение на човешкото здраве. При ниски температури се създават условия за възникване на повишена устойчивост на атмосферната стратификация, а това пречи на възможността за разместване и естествена вентилация на приземния въздух. Особено неблагоприятно е явлението „температурна инверсия“, при което натрупването на по-студени и тежки въздушни маси под относително по-топъл и по-лек въздух, е причина за трайната устойчивост на атмосферата и пречка за нейната естествена подвижност и прочистване.

Температурните инверсии в Благоевградската котловина се проявяват с висока честота, което е обусловено предимно от морфографския фактор. При сравнителния анализ на двете изследвани нива на инверсионния слой — 60 m и 750 m над земната повърхност, се установява значително по-висока повтаряемост на инверсионни състояния в по-ниския приземен слой. По-високата им честота през топлото полугодие потвърждава, че водещ фактор за тяхното формиране в котловината не са ниските зимни температури, а специфичните морфографски особености на релефа. В съответствие с това, през лятото (месец юли) и пролетта (месец април) температурни инверсии се формират през повече от половината от дните на месеца, докато през зимата (месец януари) и есента (месец октомври) тяхната проява намалява до под 1/3 от тези дни (фигура 7).



Фигура 7 – Честота на температурните инверсии в Благоевград в бр. дни/ месец

Източник: Община Благоевград. (2018). Актуализирана Програма за КАВ за периода 2019÷2023 г.

Съществена характеристика на инверсиите обаче, е параметърът устойчивост (времетраене), тъй като е пряко свързан с негативно им въздействие върху КАВ. В Благоевградската котловина устойчивостта на инверсиите най-често е до 1 денонощие. През януари инверсиите с такава продължителност обхващат около 29% от всички дни с инверсии, през април – 19%, през юли 37%, а през октомври – 31%. В 4% от случаите с инверсии през януари и в 1% - през октомври, се образува и мъгла. През месеците април и юли наличието на инверсии не е съпроводено с мъгли.

Облачност и мъгли. Средната годишна обща облачност в Благоевград е 4,8 бала, като през периода ноември – февруари, с над 6 бала. Най-ниски са нейните стойности през август – 2,5 бала . При ниско разположена облачност условията за разсейване на атмосферните замърсители се влошават. Височината на тази облачност зависи от слоя на смесване, ограничаващ проникването на замърсители над него. При приземни инверсии този слой снижава височината си и повишава риска от влошаване на КАВ (таблица 3).

Таблица 3 Наличие на ниска облачност като процент от случаите с приземна инверсия в Благоевград

Източник: Община Благоевград. (2018). Актуализирана Програма за КАВ за периода 2019÷2023 г.

Ниво на инверсионния слой (м)	**Януари**	**Април**	**Октомври**
50	44	37	22

Източник: Община Благоевград. (2018). Актуализирана Програма за КАВ за периода 2019÷2023 г.

По данни на НИМХ, в Благоевград средно годишният брой на дните с мъгла е 12. Максималният им брой се наблюдава през декември – средно 4,1, следван от януари и ноември – съответно по 2,5 и 2,3 дена месечно. Максималният годишен брой на дни с мъгла е 46, с максимален месечен брой от 21 дена през декември, следван от ноември – 15 дена, януари – 10 дена и април, и октомври – по 9 дена. Относително малък е броят на дните с мъгла, регистрирани по време на инверсии. Това потвърждава относително благоприятните морфографски параметри на котловината, в съчетание с по-високите температури, в сравнение с други котловини в страната.

Валежи. Средно годишната сума на валежа в Благоевградската котловина е 560 мм. (Климатичен справочник на България, валежи 1931-1985г.) Валежите са разпределени сравнително равномерно през отделните сезони на година, като месечните максимуми се регистрират през юни – 67 mm, и през ноември – 63 mm, а минималните през август – 31 mm, и през януари – 42 mm. Този режим отразява преходното положение на котловината спрямо климатичните зони на страната, обединявайки черти и на континентално-средиземноморската (с късно-есенен валежен максимум),

и на преходно-континенталната климатични зони. Най-новите климатични обобщения (Годишен хидрометеорологичен бюлетин на НИМХ) показват тенденция на увеличаване на есенните валежи (септември-ноември) произтичащи от по-активния генезис на средиземноморски циклони. (Стоев, 2021).

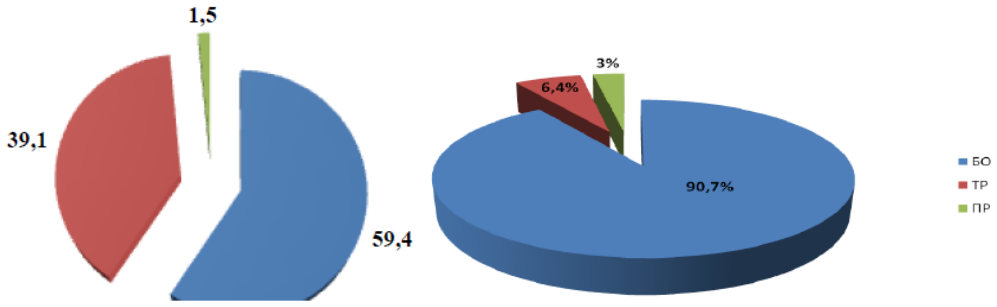
За КАВ важна валежна характеристика е времетраенето на валежите. В Благоевград най-значителен дял – около 33%, има честотата на най-краткотрайните валежи – до 5 мин. Около 22% са валежите с продължителност до 10 мин., 15% - валежите до 15 мин., 10% - валежите до 20 мин., 7% - до 25 мин. и по под 5% - останалите градации на времева продължителност. От друга страна причина за естествено запрашване на атмосферата, а също за ограничаване на възможностите за „измиване“ на въздушния басейн от замърсители, имат сушите и продължителността на безвалежните периоди. В района на Благоевград засушаванията са често явление – около 8÷12 пъти средно годишно. Продължителността на тези засушавания е средно 18÷20 дни, и е по-висока, в сравнение с голяма част от останалата територия на страната. Благоевград е сред общините, оценени като потенциално застрашени от атмосферно засушаване.

Общата оценка на климатичните и метеорологични характеристики на Благоевград показва, че този район притежава умерено изразен потенциал за самоочистване на въздушния басейн, или за задържане на замърсители в него. (Община Благоевград. (2018). Актуализирана Програма за КАВ за периода 2019÷2023 г.)

6.5. Анализ на Програмата за КАВ на Община Благоевград за периода 2019÷2023 г.

Математическо моделиране на емисиите през 2015 г. в програмата за КАВ показва, че битовото отопление и транспорта са основните замърсители на атмосферния въздух. Основната предпоставка за влошаване резсеяването на емисиите и регистриране на високи концентрации основно през есенно-зимния сезон обаче, са неблагоприятните топографски особености и климатични условия на Благоевград. В над 80 % от случаите превишенията са в дни със скорост на вятъра под 1.5 м/сек, висока относителна влажност и наличие на температурна инверсия.

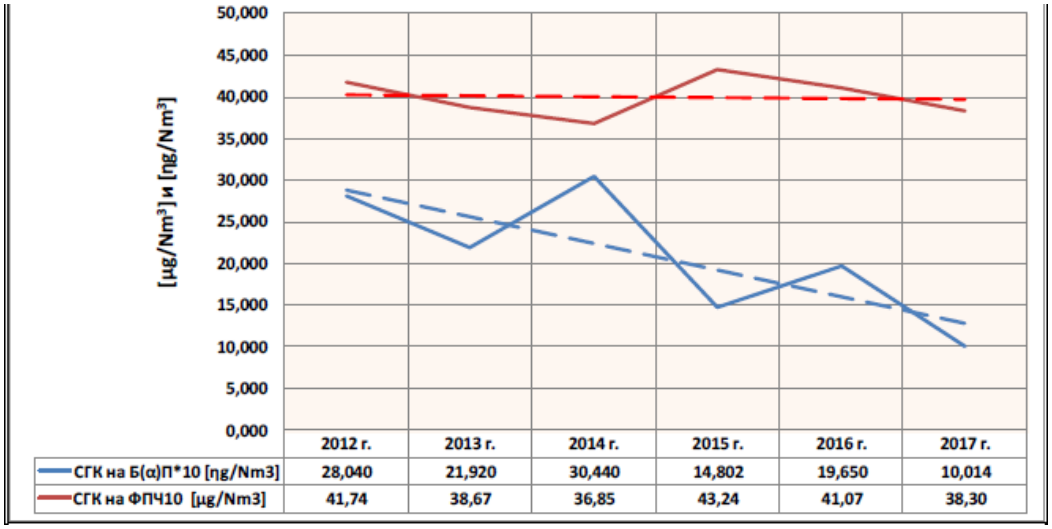
Ново дисперсионно моделиране на база 2017 г. по групи източници върху формирането на средногодишните концентрации на $ФПЧ_{10}$ (без включен фон), показва следното разпределение: най-висок дял има битовото отопление (59.4%). Почти с равна тежест (39.1%) е и замърсяването от транспорта (общо 98.5%). Промишлеността на Благоевград има скромен дял от 1.5%, който се дължи основно на промишлените площадки в Южната промишлена зона (фигура 8).



Фигура 8 – Относителен дял на отделните групи източници при формиране на средногодишните концентрации на ФПЧ$_{10}$ вляво и Б(α)П вдясно за 2017 г..

Източник: Община Благоевград. (2018). Актуализирана Програма за КАВ за периода 2019÷2023 г.

За формиране на средногодишната концентрация на Б(α)П в района на Благоевград (фигура 9), най-висок дял има битовото отопление (90,7%). Транспорта е с дял от 6.4%). Промишлеността на Благоевград има най-скромен дял от 3.0%, което се дължи на отдалечеността на промишлените площадки от жилищните райони.



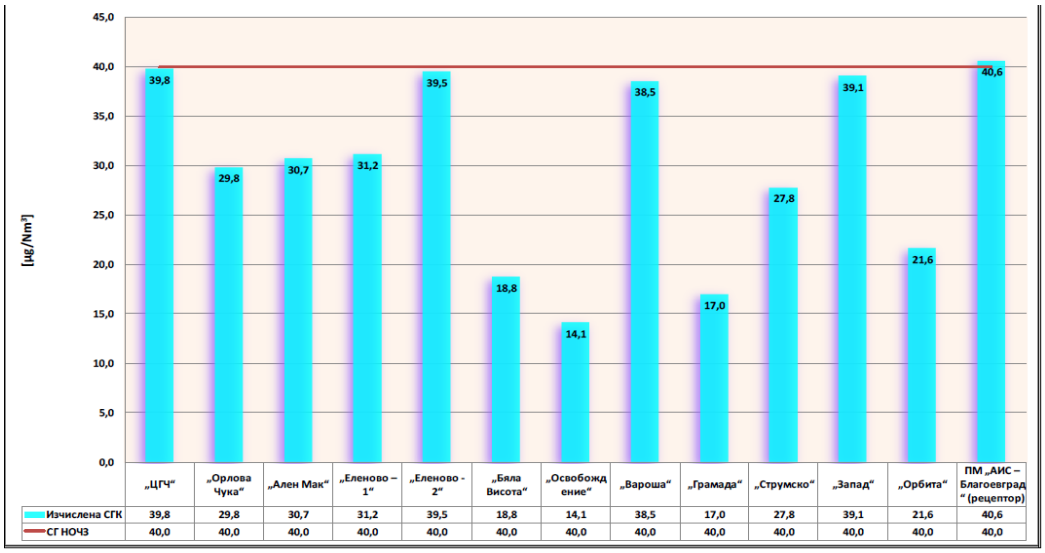
	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
СГК на Б(α)П*10 [ng/Nm3]	28,040	21,920	30,440	14,802	19,650	10,014
СГК на ФПЧ10 [µg/Nm3]	41,74	38,67	36,85	43,24	41,07	38,30

Фигура 9 – Динамика на регистрираните в ПМ „АИС Благоевград“ СГК на ФПЧ$_{10}$ и на Б(α)П като общо съдържание във фракцията на ФПЧ$_{10}$ за периода 2012÷2017 г. и линиите на тренда на развитие.

Източник: Община Благоевград. (2018). Актуализирана Програма за КАВ за периода 2019÷2023 г.

Причина за високите нива на бензо(α)пирен в общата фракция на ФПЧ$_{10}$ (установена като СДК) през студеното полугодие, е повишената консумация на горива - основно използването на твърди горива (дърва и въглища) за отопление в битовия сектор, биомаса и природен газ в промишлеността

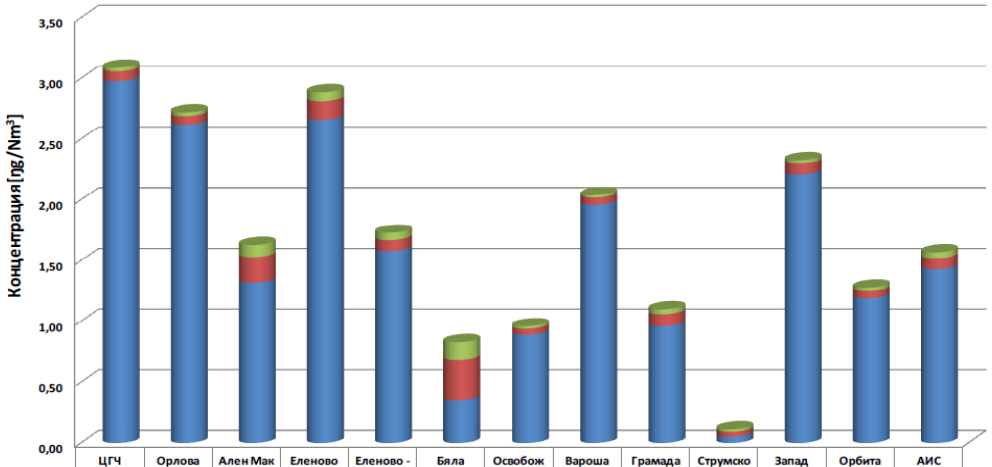
и обществения сектор, двигателите на автомобилния транспорт в комбинация са характерните за сезона температурни инверсии. Последните създават условия за задържане и значително натрупване на атмосферните замърсители в приземния въздушен слой. На фигура 10 и 11 са представени изчислените СГК на двата основни замърсителя по жилищни райони в Благоевград през 2014 г.



	„ЦГЧ“	„Орлова Чука“	„Ален Мак“	„Еленово – 1“	„Еленово - 2“	„Бяла Висота“	„Освобождение“	„Вароша“	„Грамада“	„Струмско“	„Запад“	„Орбита“	ПМ „АИС – Благоевград “ (рецептор)
Изчислена СГК	39,8	29,8	30,7	31,2	39,5	18,8	14,1	38,5	17,0	27,8	39,1	21,6	40,6
СГ НОЧ3	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0

Фигура 10 – Изчислени СГК на ФПЧ$_{10}$ за 2017 г. по жилищни квартали и комплекси в гр. Благоевград

Източник: Община Благоевград. (2018). Актуализирана Програма за КАВ за периода 2019÷2023 г.

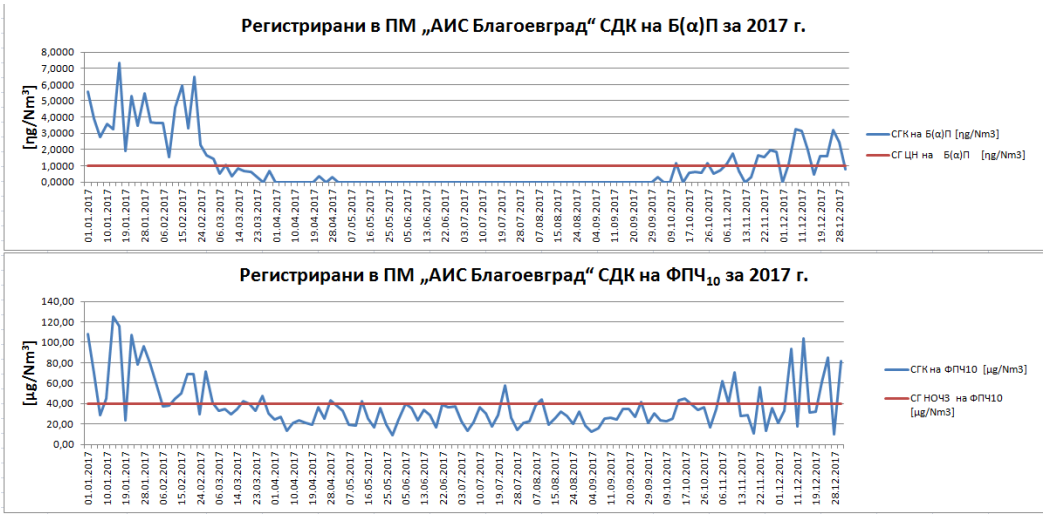


	ЦГЧ	Орлова Чука	Ален Мак	Еленово – 1	Еленово - 2	Бяла Висота	Освобождение	Вароша	Грамада	Струмско	Запад	Орбита	АИС
ПР	0,03	0,03	0,10	0,08	0,06	0,15	0,02	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03	0,05
ТР	0,08	0,07	0,21	0,15	0,09	0,33	0,05	0,06	0,10	0,04	0,09	0,06	0,09
БО	2,98	2,62	1,32	2,66	1,58	0,35	0,89	1,96	0,96	0,05	2,21	1,19	1,43

Фигура 11 – Изчислени СГК на Б(α)П за 2017 г. по жилищни квартали и комплекси в гр. Благоевград

Източник: Община Благоевград. (2018). Актуализирана Програма за КАВ за периода 2019÷2023 г.

Резултатите от анализа показват, че средногодишната концентрация на бензо(а)пирен и през шестте анализирани години показва устойчива тенденция на намаляване на регистрираните средногодишни нива. В периода 2012÷2016 г. измерените нива на СГК на Б(α)П превишават значително определената с Наредба №11 СГ ЦН за ОЧЗ от 1ng/m^3. През 2017 г. регистрираната СГК на Б(α)П е 1,0014 ng/Nm^3 и почти достига нивото на СГ ЦН. На фигура 12 е представена успоредна визуализация на регистрираните СДК на ФПЧ$_{10}$ и съдържащия се в фракцията им бензо(α)пирен за 2017 г. в ПМ – Благоевград



Фигура 12 – Регистрирани СДК на ФПЧ$_{10}$ и бензо(α)пирен за 2017 г. в ПМ – Благоевград
Източник: Община Благоевград. (2018). Актуализирана Програма за КАВ за периода 2019÷2023 г.

В резултат на дисперсионното моделиране е установено, че за постигане на установените норми за съдържание на ФПЧ$_{10}$ и Б(α)П в атмосферния въздух за територията на Община Благоевград, е необходимо да се намалят формираните през 2017 г. годишни емисии от групи източници “битово отопление“ (БО) и „транспорт“ (ТР) с минимум 50%. (Таблица 4) Тази необходима редукция е свързана със пропорционално редуциране с минимум 50% на използваните твърди горива в Битовото отопление през 2017 г. (или редуциране на емисиите чрез поставяне на очистващи съоръжения (електрофилтри) и намаляване дисперсията на пътния нанос с минимум 50%.

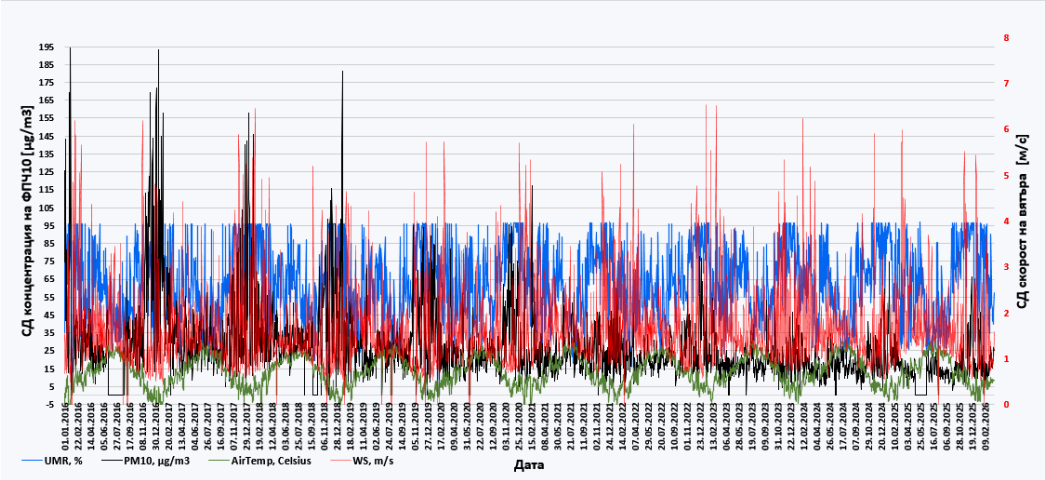
Таблица 4 – Необходима редукция на годишни емисии от БО и ТР

Източник: Община Благоевград. (2018). Актуализирана Програма за КАВ за периода 2019÷2023 г.

	Базова година 2017 г.	**Цел към 2023 г.**	**Необходима редукция**
Емисия на $ФПЧ_{10}$ от група източници „БО“ (t/y)	827,5	420,59	≥50%
Емисия $ФПЧ_{10}$ от група източници „ТР“ (t/y)	957,26	450,8	≥50%
Емисия Б(α)П (t/y)	0.0952	0.0476	50%
Брой превишения на СДН на $ФПЧ_{10}$ от 50μg/m^3	65 бр.	< 35бр.	47%
СГК на Б(α)П (ŋg/m^3)	1,965*	< 1	50% (с 0,97 ŋg/m^3)
СГК на $ФПЧ_{10}$ (μg/m^3)	38,3	≤ 28	27% (с 10,3 μg/m^3)

На фигура 13 е представено обобщение за 10 годишния период, от 2016 до 2026 г., на измерените СДК на $ФПЧ_{10}$ и връзката им със средно денонощната температура на въздуха, влажност на въздуха и средно денонощната скорост на вятъра в пункт за мониторинг - АИС Благоевград, при резолюция една стойност/денонощие. Прави впечатление, че пиковите стойности на СДК са регистрирани в есенно-зимния сезон с по-ниски температури, висока влажност на въздуха и ниска скорост на вятъра. Това потвърждава зависимостта на нивата на замърсителя от неблагоприятните метеорологични условия. От друга страна, през топлото полугодие с повишена динамика на атмосферата и по-добра способност за самоочистване, нивата са ниски и доста под ПС за СДН за $ФПЧ_{10}$

Забелязва се и обща тенденция към намаляване на СДК на $ФПЧ_{10}$. В началото на периода годишните максимални СДК са между 130 и 170 μg/m^3, а след 2021 г. между 50 и 120 μg/m^3 Очертаната тенденция е резултат от комбинираното влияние на природните (намалява броя и интензивността на неблагоприятните условия за разсейване) и антропогенни фактори (намалени емисии на вредни вещества и общите политики в тази посока, изпълнявани от местната власт).



Фигура 13 – Зависимост на ФПЧ$_{10}$ от метеорологичните условия 2016 - 2026 г. в ПМ – Благоевград

Източник на база данни: ИАОС, СИНКАВ , АИС Благоевград,

https://eea.government.bg/kav/reports/air/qReport/09/01

6.6. Мерки за намаляване на емисиите на ФПЧ$_{10}$ и ПАВ

В периода на действие на Програма за КАВ (2015-2017 г.) общинска администрация Благоевград е насочила усилията си към ограничаване на емисиите от транспортния поток чрез подобряване състоянието на пътните настилки и почистване на уличната мрежа и обществените места в Благоевград. Изпълнявани са мерките, залегнали в общинската програма, като саниране и газифициране на обществено-административни и многофамилни жилищни ссгради. Използването на газообразни горива обаче, процентно е несъпоставимо с все още голямото количество твърди горива, използвани в горивните съоръжения на битовия сектор.

Данните от АИС Благоевград през 2017 г. показват, че една година преди края на планирания период не е постигнато съответствие с нормите за опазване на човешкото здраве по отношение на ФПЧ$_{10}$ и Б(α)П. Това показва, че прилаганите до тогава мерки не са достатъчно ефективни по отношение на двата ключови атмосферни замърсителя, което налага оценка и преразглеждане на мерките.

Според отчета за изпълнение на Програмата за КАВ, с период на действие 2019-2023, през 2023 г. са изпълнени следните (краткосрочни и дългосрочни) мерки обобщени в две генерални мерки както следва:

Генерална мярка Bl_Dh - Намаляване емисиите на ФПЧ$_{10}$ и Б(α)П от битовото отопление. Включва система от мероприятия, които до доведат до снижаване на консумацията на дърва и въглища за горене от населението в Община Благоевград

✓ Bl_Sh_ Dh _a_2 Подготовка и реализация на проекти за подмяна на стационарни индивидуални и многофамилни домакински устройства на твърдо гориво – ежегодно да бъдат обхванати минимум 10 % от домакинствата отопляващи се на твърди горива. През 2023 г. е извършено проучване и са определени 4 зони за подмяна на индивидуални горивни устройства на твърдо гориво, както следва: Зона 1 (силно проблемни райони) – включва райони, които произвеждат най-голям дял от емисиите на $ФПЧ_{10}$ от битово отопление, с най-голяма концентрация на „горещи точки“ в общината, или това са територите, които попадат в Централната градска част – 29.6% от целевата група, 2211 домакинства на твърдо гориво. Зона 2 (средно проблемни райони) – включва райони, които са на второ място по дял на емисиите на $ФПЧ_{10}$ от битово отопление: Струмско, Еленово 1 и Еленово 2 - 35.1% от целевата група, 2622 домакинства на твърдо гориво. Зона 3 (умерено проблемни райони) – включва райони, които са на трето място по дял на емисиите на $ФПЧ_{10}$ от битово отопление: Ален мак, Бялата висота, Запад, Орлова чука, Освобождение, Грамада - 22.2% от емисиите на $ФПЧ_{10}$, 1658 домакинства на твърдо гориво. Зона 4 (слабо проблемни райони) – включва райони, които емитират най-малък дял на емисиите на $ФПЧ_{10}$ от битово отопление: с. Рилци, с. Покровник, с. Бело поле, с. Изгрев, с. Българчево, с. Зелен дол, с. Еленово, с. Бучино, с. Мощанец, с. Делвино, с. Марулево - 13.1% от емисиите на $ФПЧ_{10}$, 978 домакинства на твърдо гориво;

✓ Bl_Lt_Dh_t_1 Изпълнение на проекти за обновяване на общите части и саниране на многофамилни жилищни сгради. Изпълнение на енергоспестяващи мерки През 2023 г. мярката не е изпълнявана, поради липса на финансиране;

✓ Bl_Lt_Dh_t_2 Продължаване на процеса на газификация на жилищни и обществени сгради. Към 31.12.2023 г. на територията на гр. Благоевград, броят на битовите потребители е 3072 с годишна консумация 19 693,378 MWh, обществено административните потребители са 160 броя с годишна консумация 18 431,140 MWh;

✓ Bl_Lt_Dh_t_3 Реализиране на проекти за внедряване на енергоспестяващи мерки в жилищните сгради включително подмяна на индивидуални и многофамилни устройства на твърдо гориво със алтернативни нискоемисионни отоплителни източници. През октомври 2023 г. е внесено проектно предложение по процедура BG 16FFRP0002.5/002 – За по- чист въздух на оперативна програма околна среда 2021 – 2027 г.;

✓ Bl_Lt_Dh_t_4 Проучване и поставяне на индивидуални пречиствателни устройства (филтри) на горивните инсталации в еднофамилни и/или многофамилни жилищни сгради. През 2023 г. мярката не е изпълнявана, поради липса на финансиране.

✓ Bl_Lt_Dh_a_4 Проучване и поставяне на нови автоматични станции за контрол на КАВ в рискови зони на общината. През 2022 г. е изградена система за мониторинг на ФПЧ в реално чрез инсталиране на 20 броя сензори на територията на гр. Благоевград. Данните са достъпни на адрес https://gisportalblagoevgrad.eu/?page_id=38 (ИПБ - СМФПЧ) и в платформата purpleair.com. През 2023 г. не е възникнала необходимост за поставяне на нови автоматични станции за КАВ.

Генерална мярка Bl_Tr: Снижаване на средното ниво на нанос върху пътните платна в границите на транспортната схема на Община Благоевград с цел Намаляване емисиите на $ФПЧ_{10}$ от транспорта.

✓ Bl_Sh_Tr_t_1 Повишаване контрола върху изпълнението на дейностите по мокро метене и миене на уличната мрежа и обществените територии. Извършен е стриктен контрол на дейностите по изготвени графици за изпълнение на съответните мероприятия. През 2023 г. годината са измити 3 082 584 м2, 17 бр. Дворове на училища, 30 междублокови пространства и 16 села;

✓ Bl_Sh_Tr_t_2 Изграждане/реконструкция/рехабилитация на уличната мрежа и тротоари на територията на общината в т. ч ремонти и изграждане на тротоари на площ 1024,67 м2, възстановена асфалтова настилка с плащ. 3983,3 м2, положена хоризонтална пътна маркировка – надлъжна 4371,18 м2, напречна - 4572,79 м2 .;

✓ Bl_Sh_Tr_t_4 Благоустройство и озеленяване на крайпътните и междублоковите пространства. През годината са възстановени и поддържани приблизително 707 542 м2 зелени площи, в т. ч. паркове, градини и междублокови пространства;

✓ Bl_Sh_Tr_a_1 Обновяване на автобусите от градския транспорт, с автобуси, отговарящи най-малко на стандарт за вредни емисии ЕВРО 5, автобуси на газ и/или електро- и хибридни. През 2023 г. са закупени 6 броя електробуси по проект „Интегриран градски транспорт на град Благоевград“, финансиран по Оперативна програма „Региони в растеж 2014 – 2020 г.“; .

✓ Bl_Lt_Tr_t_6 - Изграждане на велоалеи на територията на община Благоевград. До края на 2023 г. Община Благоевград има изградени велоалеи с обща дължина 2 538 м. През 2023 г. не са изградени нови.

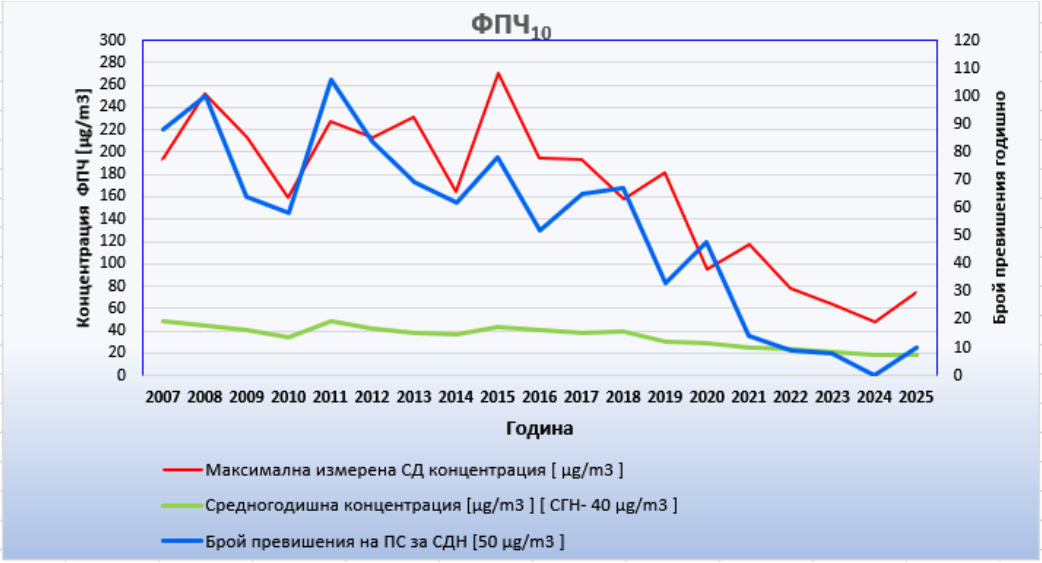
В отчета на Община Благоевград за изпълнение на Програма за опазване на околната среда на общината за периода 2021–2028 г., за 2025 е отбелязано изпълнението на следните дейности в сектор „въздух“, които допълват дейностите по генералните марки и подмерки насочени към ограничаване на емисиите от битово отопление и транспорта:

- ✓ До края на 2025 г. са изведени от експлоатация и предадени за рециклиране са 1114 печки на твърдо гориво и 38 котли по проект за подобряване качеството на атмосферния въздух чрез подмяна на отоплителни устройства на твърдо гориво с алтернативни форми на отопление на територията, финансиран по Програма „Околна среда“ 2021-2027 г.,;
- ✓ Обновяват се сградите на кметствата в 5 села в общината - Бучино, Зелен дол, Логодаж, Падеш и Покровник по проект за въвеждане на мерки за енергийна ефективност, финансиран по програма „Национален план за възстановяване и устойчивост”;
- ✓ За периода 2024 – 2025 г., по процедура „Подкрепа за устойчиво енергийно обновяване на жилищния сграден фонд“ са сключени договори за общо 29 многофамилни жилищни сгради;
- ✓ През 2025 г. е осигурено финансиране за изпълнение на мерки за намаляване на разходите за енергия и повишаване на енергийната ефективност в сградите на 10 социални услуги.
- ✓ За по-ефективно почистване на основните пътни артерии, включително миене на улиците в целия град и в селата на община Благоевград, през 2025 г. са доставени допълнително 3 сметосъбиращи автомобила, 3 самосвала, 1 самосвал с кран и водоноска с обем 8 т.;
- ✓ По проект „Интегриран градски транспорт на град Благоевград” общината поддържа 6 (шест) електрически автобуси, като превозните средства са с нулеви нулеви въглеродни емисии;
- ✓ През 2025 г. са засадени 206 бр. дървета и 933 бр. храсти;
- ✓ Разработена е нова Наредба за изграждане, поддържане и опазване на зелената система на територията на община Благоевград, приета 2026 г.

7. Тенденции в състоянието на въздуха през 2007 – 2025 г.

Данните от мониторинга на ФПЧ в АИС за КАВ – Благоевград от 2007 до 2025 година показват два ясно определени периода по отношение на нивата на замърсяване. Първият преиод (2007-2018 .) се характеризира с голям брой превишения на СДН за $ФПЧ_{10}$, над нормативно определените 35 пъти в рамките на календарна година (между 52 и 100 пъти/год.), с високи максимални СДК (между 165 и 252 μg/m^3), както и с високи СГК (между 39 и 49 μg/m^3). Вторият период (2019-2025) се отличава със значително по-ниски концентрации. Превишенията на СДН за $ФПЧ_{10}$ са между 0 и 48 броя годишно, като единствената година с над 35 пъти, е 2020 г. Благоприятна е тенденцията и при регистрираните максималните СДК (между 48 и 181 μg/m^3), и СГК (между 18 и 30 μg/m^3). След 2021

г. регистрираните превишения на СДН са съответно 14 бр. през 2021 г.; 9 бр. през 2022 г.; 8 бр. през 2023 г.; 0 бр. през 2024 г., 10 броя през 2025 г. и 0 бр. за периода м. януари - м. май 2026 г. Резултатите са обобщени във фигура 14.



Фигура 14 - $ФПЧ_{10}$, 2007 – 2025 г. в пункт за мониторинг на КАВ – Благоевград

Източник: РИОСВ – Благоевград, Годишен доклад за състояние на околната среда и месечен бюлетин за ФПЧ

Замърсяването с $ФПЧ_{10}$ остава основен проблем за КАВ в страната и района на Благоевград, като се запазва тенденцията през зимните месеци при неблагоприятни метеорологични условия нивата на $ФПЧ_{10}$ да са по-високи. След 31.12.2023 г. не са регистрирани превишения на нормите за този замърсител в АИС Благоевград, поради което не е необходима актуализация, или разработване на нова програма за подобряване на КАВ в Благоевград.

8. Заключение

Качеството на въздуха в Благоевград търпи позитивна трансформация от стратегическо планиране към реално подобряване. През последните години се наблюдава траен спад на емисиите на вредни вещества и намаляване на общия товар на ФПЧ в градската среда. Провежданите от Общинска администрация регионални политика и изпълнявани проекти дават видим екологичен и социален резултат. Въпреки положителните тенденции, експертите идентифицират два критични фактора, които ограничават пълното решаване на проблема. Специфичното географско

разположение на Благоевград в котловина остава естествен фактор за задържане на замърсителите. Дори при по-малко източници на горене, атмосферната циркулация през зимния сезон винаги води до макар и по-малко на брой пикови превишения на нормите. Вторият фактор е транспортния натиск. Докато битовото отопление се трансформира успешно, нарастващия автомобилен трафик все още не е компенсиран с адекватни зелени мерки. Важна стъпка в тази посока е ускорената модернизация на обществения транспорт, оптимизация на движението по главните булеварди и ефективни мерки срещу запрашаването на пътната настилка.

Използвана литература:

Европейска агенция по околна среда (ЕАОС). https://www.eea.europa.eu/bg https://www.eea.europa.eu/en

Европейска агенция по околна среда (ЕАОС). *European Air Quality Index* https://airindex.eea.europa.eu/AQI/index.html

Европейска Комисия, Представителство в България, Новини и събития 2026 (ПЕКБ) https://bulgaria.representation.ec.europa.eu/novini-i-sbitiya/novini-0_en?prefLang=bg)

Изпълнителна агенция по околна среда - Република България *Националната система за мониторинг на качеството на атмосферния въздух* (ИАОС, НСМКАВ) https://eea.government.bg/air-shum

Изпълнителна агенция по околна среда - Република България (ИАОС). *РОУКАВ – ИАОС* https://old.eea.government.bg/bg/soer/2010/air/kachestvo-na-atmosferniya-vazduh

Изпълнителна агенция по околна среда - Република България *Система за информиране на населението за качеството на атмосферния въздух (ИАОС, СИНКАВ)* - https://eea.government.bg/kav/

Изпълнителна агенция по околна среда - Република България (ИАОС). *Ежедневен бюлетин за качеството на атмосферния въздух в страната* - https://eea.government.bg/airq/bulletin.jsp#

Изпълнителна агенция по околна среда - Република България (ИАОС). *Качеството на въздуха – проблеми и мерки за подобряването му* https://eea.government.bg/bg/soer/2024/1Air.pdf

Институт за здравни ефекти (HEI) (2022) *Тенденции в качеството на въздуха и здравето в България: Специален доклад за състоянието на въздуха в световен мащаб. Бостън, Масачузетс* https://www.stateofglobalair.org/

Интерактивен портал – Благоевград, Система за мониторинг на фини прахови частици (ИПБ - СМФПЧ) https://gisportalblagoevgrad.eu/?page_id=38

Любителски мрежи/платформи с данни за КАВ в реално време (ЛМКАВ):

meter.ac - https://meter.ac/

aqicn.org - https://aqicn.org/network/meterac/

airbg.info - https://airbg.info/karta/

sensor.coμmunity - https://sensor.coμmunity/bg/

purpleair.com - https://map.purpleair.com/air-quality-standards-us-epa-aqi?opt=%2F1%2Flp%2Fa10%2Fp604800%2FcC0#12.48/42.00652/23.0878

Министерство на околната среда и водите (МОСВ). *Въздух.* *https://www.moew.government.bg/bg/vuzduh/*

Министерство на околната среда и водите (МОСВ). (2007) *Национална програма за намаляване на общите годишни емисии на серен диоксид, азотни оксиди, летливи органични съединения и амоняк в атмосферния въздух. (НПНОГЕАВ)* *http://www5.moew.government.bg/wp-content/uploads/filebase/Air/Strategicheski_dikumenti/National_Prograμm_decr_annual_em_SO2_NOx_NH3_VOC.pdf*

Министерство на околната среда и водите (МОСВ). (2019) *Национална програма за подобряване качеството на атмосферния въздух 2018 – 2024г. (НППКАВ)* https://www.moew.government.bg/static/media/ups/tiny/Air_new/Natzionalna_programa_podobriavane_KAV_2018-2024.pdf

Министерство на околната среда и водите (МОСВ). (2025) *Актуализирана Национална програма за контрол на замърсяването на въздуха 2020 – 2030 г. (АНПКЗАВ)* *https://www.moew.government.bg/static/media/ups/tiny/Air_new/20250702_Actualisation_of_the_NAPCP_BG.pdf*

Министерство на околната среда и водите (МОСВ). (2026) *Национални новини:* https://www.moew.government.bg/bg/prescentur/nacionalni-novini/

Министерство на околната среда и водите (МОСВ). (2025) *Отчет за 2024 г. за изпълнението на Национална програма за подобряване качеството на атмосферния въздух 2018 – 2024г. (НППКАВ)*

https://www.moew.government.bg/static/media/ups/tiny/Air_new/Otchet_NPPKAV_2024.pdf

Министерство на здравеопазването (МЗ). Национален център по обществено здраве и анализи (НЦОЗА). (2022). *Обобщен доклад за влиянието на атмосферния въздух върху здравето на населението през 2022 г.* *https://ncpha.government.bg/index/103-dokladi-i-analizi.html*

Национален институт по метеорология и хидрология – Република България (НИМХ). (2007 - 2025). *Годишни и месечни хидрометеорологични бюлетини* https://bulletins.meteo.bg/

Община Благоевград. (2011). *Програма за намаляване на вредните емисии в атмосферния въздух ($ФПЧ_{10}$) на територията на гр. Благоевград 2011 г.* https://test.eea.government.bg/bg/prev_nsmos/waste/air/roukav/obshtini3/blagoevgrad.pdf

Община Благоевград. (2016). *Актуализация на програма за намаляване на вредните емисии в атмосферния въздух на фини прахови частици и полициклични ароматни въглеводороди на територията на Община Благоевград период на действие: 2015 – 2018 година* https://blagoevgrad.bg/ckeditor_assets/attachments/27421/Programa-KAB-Blagoevgrad.pdf

Община Благоевград. (2018). *Актуализирана Програма за КАВ за периода 2019÷2023 г.* https://admin.blagoevgrad.bg/ckeditor_assets/attachments/34665/Programa_KAV_Blagoevgrad_MOSV.pdf

Община Благоевград. (2024). *Доклад за изпълнение на мерките, заложени Актуализирана Програма за КАВ за периода 2019÷2023 г. за периода 01.01.-31.12.2023 г.* https://admin.blagoevgrad.bg/ckeditor_assets/attachments/48467/Доклад_за_изпълнение_на_мерките_-2023.pdf

Община Благоевград. (2021). *Програма за опазване на околната среда на Община Благоевград за периода 2021 – 2028 г.* https://blagoevgrad.bg/ckeditor_assets/attachments/27861/POOS_na_Obshtina_Blagoevgrad_2021-2028.pdf

Община Благоевград. (2026). *Отчет за 2025 г. за изпълнението на Програма за опазване на околната среда на общината за периода 2021–2028 г.* https://blagoevgrad.bg/news/obs-blagoevgrad-prie-otcheta-za-2025-g-za-izpulnenieto-na-programa-za-opazvane-na-okolnata-sreda-na-obshtinata-za-perioda-2021-2028-g https://blagoevgrad.bg/ckeditor_assets/attachments/27861/POOS_na_Obshtina_Blagoevgrad_2021-2028.pdf

Община Благоевград. (2026). *Наредба за изграждане, поддържане и опазване на зелената система на територията на община Благоевград* https://blagoevgrad.bg/static/1413

РИОСВ – Благоевград, (2008-2024) *Годишен регионален доклад за състояние на околната среда* https://riosvbl.org/index.php/public-reg-info/82-riosv/env-stat/654-doklad-os

Стоев, К. С. (2021 г.), *Средиземноморски циклони и опасни метеорологични явления - фьонът в София* https://ras.nacid.bg/dissertation-preview/70094

EUR-Lex. Директива 2008/50/ЕО на Европейския парламент и на Съвета от 21 май 2008 година относно качеството на атмосферния въздух и за по-чист въздух за Европа https://eur-lex.europa.eu/legal-content/BG/TXT/?uri=CELEX%3A02008L0050-20150918

EUR-Lex. Директива (ЕС) 2024/2881 на Европейския парламент и на Съвета от 23 октомври 2024 година относно качеството на атмосферния въздух и за по-чист въздух за Европа *https://eur-lex.europa.eu/legal-content/BG/TXT/?uri=CELEX%3A32024L2881&qid=1780695921786*

EUR-Lex. Директива 2004/107/ЕО на Европейския Парламент и на Съвета от 15 декември 2004 година относно съдържанието на арсен, кадмий, никел и полициклични ароматни въглеводороди в атмосферния въздух *https://eur-lex.europa.eu/legal-content/BG/TXT/?uri=CELEX%3A32004L0107&qid=1780673091566*

Stringmeteo.com: *Климатични данни за избрани български станции, ("Климатичен справочник" - темп. 1931-1970г., вал. 1931-1985г.)* https://www.stringmeteo.com/synop/bg_climate.php

ГЕОЛОГО-МОРФОСТРУКТУРНИ И МОРФОХИДРОГРАФСКИ ОСОБЕНОСТИ НА ОБЛАСТТА КРАИЩЕ В РЕПУБЛИКА СЪРБИЯ

Милена Миленова[a], Красимир Стоянов[b], Галина Безинска[a]

[a] Югозападен университет „Н. Рилски“, ул. И. Михайлов № 66, Благоевград 2700, България
[b] Институт за изследвания на климата, атмосферата и водите – БАН, бул. „Цариградско шосе“, № 66, 1784, София, България

РЕЗЮМЕ

Краище е физикогеографска област на Балканския полуостров, разположена в Западна България, Югоизточна Сърбия и частично в Република Северна Македония. В пределите на Сърбия тя обхваща планинско-котловинна територия около Босилеградската котловина и прилежащите високи планински масиви. Регионът се характеризира със сложен геолого-тектонски строеж, силно разчленен релеф и гъста хидрографска мрежа. В статията са разгледани геолого-морфоструктурните, геоморфоложките и хидрографските особености на сръбската част на Краище с акцент върху релефа, вододелите и речните басейни. Резултатите показват, че територията представлява ясно обособена морфохидрографска система, организирана около басейна на р. Драговищица, чиито притоци играят съществена роля за формирането на съвременния релеф и пространствената организация на района.

КЛЮЧОВИ ДУМИ: Краище, Босилеград, морфохидрография, релеф, река Драговищица, Югоизточна Сърбия, геоморфология

GEOLOGICAL-MORPHOSTRUCTURAL AND MORPHOHYDROGRAPHIC CHARACTERISTICS OF THE KRAJIŠTE REGION (REPUBLIC OF SERBIA)

Milena Milenova[a], Krasimir Stoyanov[b], Galina Bezinska[a]

[a]South-West University „N. Rilski“, Ivan Mihaylov str.66, Blagoevgrad 2700, Bulgaria
[b] Climate, Atmosphere and Water Research Institute – BAS, Tsarigradsko shose Bld. 66, Sofia 1784, Bulgaria

ABSTRACT

Kraište is a physical-geographical region of the Balkan Peninsula situated in western Bulgaria, south-eastern Serbia, and partly in North Macedonia. In Serbia, it comprises a distinct mountain-and-basin area centred on the Bosilegrad Basin and the surrounding high mountain massifs. The region is characterised by a complex geological and tectonic framework, highly dissected relief, and a dense hydrographic network with predominantly torrential river regimes. This paper examines the geological-morphostructural, geomorphological, and hydrographic characteristics of the Serbian part of Kraište, with emphasis on relief, watersheds, and river basins. The results indicate that the area constitutes a clearly differentiated morphohydrographic system organised around the Dragovištica River basin, whose tributaries play a key role in shaping the contemporary relief and spatial organisation of the region.

KEYWORDS Kraište, Bosilegrad, morphohydrography, relief, Dragovishtitsa River, Southeastern Serbia, geomorphology

Увод

Краище е една от характерните природногеографски области на Балканския полуостров. То се развива в преходната зона между Западна България, Югоизточна Сърбия и в малка част североизточните периферии на Република Северна Македония. Именно това трансгранично положение, съчетано със сложния геоложки строеж и ясно изразения планински релеф, обуславя значителното разнообразие на природните компоненти и формира специфичния облик на областта.

В геотектонско отношение районът е разположен в близост до мястото на съчленяване на два клона на Алпийския орогенен пояс на Балканския полуостров – северно - до източновергентните Карпати и Балканиди и югозападновергентните Динариди и Хелениди. Това обуславя сложната структурна организация на Краище и неговото важно място в геоложките и геоморфоложките изследвания на Балканите (Бончев, 1936, 1958; Загорчев, 2001, 2006; Иванов, 2017; Коунов и др., 2025).

В по-широк регионален смисъл Краище представлява единна планинско-котловинна област, развита от двете страни на съвременните държавни граници. В рамките на настоящия доклад обаче предмет на анализ е само сръбската част на Краище, локализирана предимно в района на община Босилеград. Тази територия е с ясно изразен планински характер, значителна вертикална разчлененост и добре развита речна мрежа, насочена към басейна на река Струма.

Целта на настоящия доклад е да представи геолого-морфоструктурните и морфохидрографски особености на областта Краище в Република Сърбия чрез анализ на географското положение,

границите, геолого-морфоструктурната основа, релефа, хидрографската мрежа и основните съвременни геоморфоложки процеси.

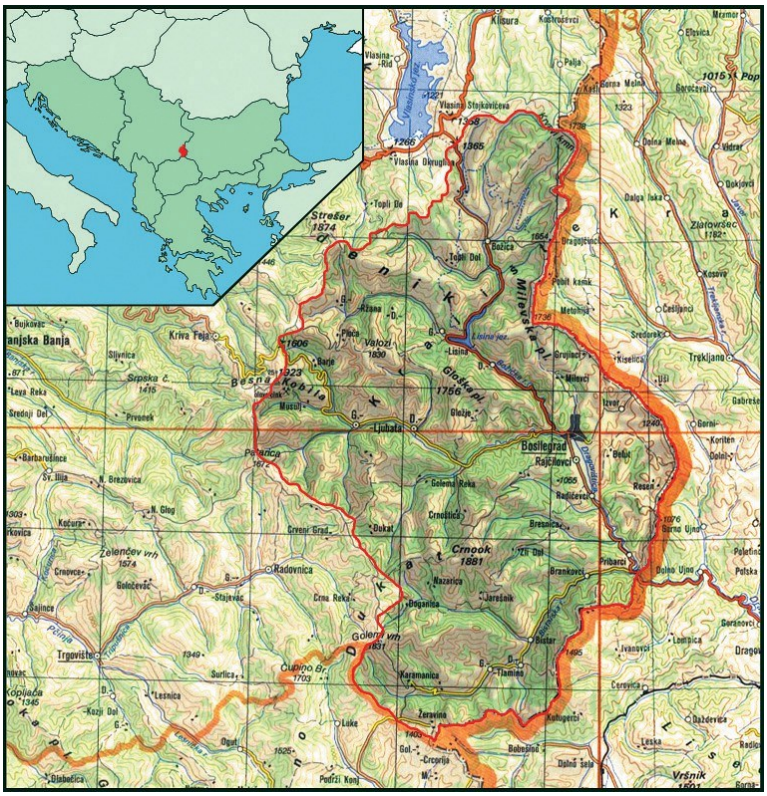
1. Материали и методи

Изследването е проведено чрез съчетаване на кабинетни и теренни методи. Използвани са топографски и геоложки карти, научна литература и цифрови модели на релефа. За уточняване на морфоложките и хидрографските особености са проведени теренни проучвания през периода 2023-2025 г. в района на Босилеградската котловина, планините Църноок (Дукат), Милевска планина и Власинското плато.

По време на теренните наблюдения са документирани основни релефни форми, речни долини, вододели, ерозионни участъци, склонови процеси и хидротехнически обекти. Извършени са маршрутни наблюдения, фотодокументиране и GPS локализиране на характерни обекти. Морфометричните характеристики на планинските дялове (надморска височина, посока на простиране, дължина и ширина) са определени чрез измервания върху топографски карти (Таблица 1).

2. Географско положение и граници на изследваната територия

Сръбската част на Краище е разположена в най-югоизточните части на Република Сърбия, главно в района на Босилеград. Тя обхваща планинско-котловинна територия, включваща Босилеградската котловина и обкръжаващите я високи масиви на Бесна кобила, Варденик, Дукат (Църноок), Валози, Глошка и Милевска планина. От морфохидрографска гледна точка това е пространство, организирано около горното и средното течение на река Драговищица и нейните притоци (Ранджелович и др. 2008) (фиг. 1).



Фигура 1 - Топографска карта на околностите на Босилеград (област Краище, Сърбия) (Ранджелович и др. 2008). С червена линия е очертана изследваната територия; виждат се Босилеградската котловина, обкръжаващите я масиви (Бесна кобила 1923 m, Валози, Глошка 1756 m, Дукат–Църноок 1881 m, Милевска планина) и долинната мрежа на река Драговищица. Държавната граница с България следва билото на Милевска планина

В широк регионален аспект Краище се развива на територията на три държави - България, Сърбия и в малка част Република Северна Македония. Според картния материал, използван при настоящото изследване, изследваната сръбска част на Краище граничи държавно единствено с Република България. Този граничен сектор е разположен по източната и североизточната периферия на района и в значителна степен съвпада с билото на Милевска планина, както и с периферията на долината на Драговищица. Изследваната територия не достига държавната граница с Република Северна Македония, поради което южната ѝ граница в рамките на разглеждания обхват е вътрешна, а не държавна.

На север границата на изследваната територия достига района на Власина Округлица, Стрешер и северните разклонения на Милевска планина, където се проследяват ясно изразени вододелни линии и високи ридове. На запад тя преминава по билните части на Бесна кобила и прилежащите ѝ височини, които изпълняват ролята на основен морфоструктурен и вододелен рубеж. На юг

границата следва високите части на Дукат, района на Църноок и южните вододелни ридове към Големи връх. Следователно северната, западната и южната граница на изследваната област са вътрешни природногеографски граници, определени от планински била, склонове и вододели в пределите на Сърбия.

Така очертаните граници са преди всичко естествени морфохидрографски граници. Те следват главни вододели, високи планински била и периферии на дълбоко врязани долини. Това придава на района ясно изразена пространствена цялост, в която релефът и хидрографската мрежа формират единна система.

3. Геолого-морфоструктурна основа

Морфохидрографските особености на Краище са тясно свързани с неговия сложен геолого-тектонски строеж. Първите по-цялостни интерпретации на основните структури в района са свързани с трудовете на (Димитров и Димитров, 1931), които разглеждат основните тектонски елементи като предпалеогенски напречни разломи. По-късно (Бончев 1936, 1958) определя Краището като самостоятелна тектонска единица в рамките на Балканския алпийски ороген, простираща се в посока северозапад - югоизток. Това схващане е доразвито в по-късни обзорни и структурни изследвания (Загорчев, 1984, 2001, 2006; Иванов, 1998, 2017; Коунов и др., 2010, 2025).

Според по-новите геоложки изследвания в района се разграничават две основни литотектонски единици - Струмска и Власинско-Моравска, чието предкъснокредно развитие е различно (Загорчев, 1984; Коунов и др., 2010, 2025; Антич и др., 2016, 2017). Именно различната литология, степен на метаморфизъм и структурна организация на тези единици оказват съществено влияние върху релефа и речната мрежа.

В сръбската част на района широко разпространение имат кристалинни шисти, гнайси, микашисти, кварцити, гранитоиди, диабаз-филитоидни скали и отделни вулканогенни комплекси. В района на Църноок са установени преддевонски кристалинни шисти от Ярешнишката серия, кварцити и кредни порфироидни гранити (Бабович и др., 1976, 1977). В различните части на водосборите се срещат още гранит-гнайси, андезити и неогенни наслаги. По-устойчивите скали изграждат билни и куполни форми, докато зоните, изградени от по-слабо устойчиви комплекси, са благоприятствали развитието на долини, ерозионни разширения и котловинни понижения.

Морфоструктурата на Църноок е показателен пример за връзката между геоложката основа и релефа. Районът е разглеждан като брахиантиклинала или „купол на Църноок“, за чието формиране се предполага участие на гранитен масив (Бабович и др., 1977). Това обяснява ясно изразената куполна морфология и сравнително компактната форма на този висок планински масив.

4. Релефна характеристика

Релефът на сръбската част на Краище е предимно планински и хълмисто-планински, със значителна вертикална разчлененост и ограничено участие на заравнени повърхности. Преобладават терени с надморска височина над 800 m, което ясно подчертава планинския характер на района.

Главните морфоструктурни единици и техните морфометрични характеристики са обобщени в Таблица 1. Най-висок е масивът Бесна кобила (връх Бесна кобила, 1923 m), следван от Дукат с връх Църноок (1881 m), Варденик с връх Велики Стрешер (1876 m), Глошка планина (1756 m), Валози (1829 m), Милевска планина с връх Бандера (1736 m) и Доганица (1621 m) (Миланов. Г, 2016).

Таблица 1 - Морфометрична характеристика на главните планински дялове в Босилеградско Краище

№	Планински дял	Най-висок връх	Н.в. (m)	Посока на простиране	Дължина (km)*	Ширина (km)*
1	Бесна кобила	Бесна кобила	1923	СЗ–ЮИ (блоково-куполен масив)	9	8
2	Дукат	Църноок	1881	СЗ–ЮИ (издължена тристранна форма)	15	9
3	Варденик	Велики Стрешер	1876	СЗ–ЮИ (плоско, разлато било)	11	8
4	Глошка планина	Глошка	1756	С–Ю / СЗ–ЮИ	7	6
5	Валози	Валози	1829	СЗ–ЮИ	6	5
6	Милевска планина	Бандера	1736	С–Ю	16	10
7	Доганица	Доганица	1621	СЗ–ЮИ	7	5

** Измерванията са картометрични, по топографска карта 1:200 000 (1 cm = 2 km)*

За слетите масиви (Дукат–Църноок, Бесна кобила–Валози) границата носи неопределеност ±2–3 km.

Характерна черта на релефа е преобладаването на стръмни склонове и дълбоко врязани долини. На значителна част от територията наклоните надвишават 25%, докато терените с наклон под 15% са ограничени главно в Босилеградската котловина и в отделни разширения на речните долини.

Плавно закръглените хълмисти форми имат ограничено разпространение, а по-голямата част от територията се характеризира със силно разчленен орографски строеж.

Единствената по-ясно изразена почти равна територия е Босилеградската котловина, представляваща понижен участък от Родопския масив. Нейната периферия е изградена от стари кристалинни скали, а дъното - от неогенски седименти, свидетелстващи за съществуването на древно езеро през неогена. Тя е оградена от планините Рисовица на север, Рамни дел и Лещава на североизток, Кремиково на изток и Райчиловски рид на запад. Средната ѝ дължина е около 5,5 km, а средната ширина - около 1,5 km. Надморската височина варира приблизително от 730 m в северната част до около 660 m в района на град Босилеград, с наклон около 15 %.

Особен интерес представлява районът на Църноок, който в морфоложко отношение представлява високопланинско пространство с широко развити пасищни повърхности. Вследствие на дълготрайна човешка намеса горната граница на гората е антропогенно понижена и в много участъци се намира между 1500 и 1710 m. Над тази граница се разкриват обширни открити пространства, изложени на прякото въздействие на студения планински климат, което създава условия за развитие на съвременни азонални периглациални процеси и форми (Белий и др., 2008; Милошевич и др., 2007). Макар върховете да се намират под съвременната снежна граница и да не носят ледникови форми, периглациалните явления оказват важно влияние върху моделирането на високопланинския релеф; подобни образувания (туфури) са установени и в съседния район на Власинското плато (Милошевич и др., 2007).



Фигура 2 - Бесна кобила (1923 m) — най-високият връх на изследваната територия и на Сръбско-Македонския масив в Югоизточна Сърбия. Заобления билна повърхност, изградена от кристалинни

шисти, носи следи от продължителна денудация; антропогенно снижената горска граница разкрива обширни безлесни заравненост, върху които се развиват съвременни периглациални форми. Върхът лежи на главния вододел Морава–Струма (Черноморска/Егейска водосборни области).

5. Хидрографска характеристика

Хидрографската мрежа на Краище е гъста, добре развита и тясно свързана с планинския характер на релефа. Реките и потоците са богати на вода през по-голямата част от годината, особено в горните си течения, и имат ясно изразен поройно-буен характер. Това свидетелства за силно развита както повърхностна, така и дълбочинна ерозия.

Съвременната речна мрежа се е формирала през кватернера, след изчезването на мио-плиоценските езера. Впоследствие речните течения са се врязали бързо в релефа, подпомогнати от неотектонските вертикални движения. Това е довело до формирането на дълбоко врязани долини, големи относителни височини и ясно изразени проломи в надлъжните профили на някои водни течения.

Хидрографски районът има особено значение, защото всички водни течения на територията на община Босилеград принадлежат към Егейския водосбор. Те се оттичат чрез река Драговищица към Струма, а оттам към Егейско море. В това отношение Краище представлява една от малкото части на Сърбия, чиито повърхностни води принадлежат към Егейската отточна област.

Планинската верига Беле воде - Бесна кобила - Варденик формира важен вододелен рубеж между Черноморския и Егейския водосбор, както и вододел между басейните на Южна Морава, Струма и Пчиня. Северозападно от този рубеж водите принадлежат към Черноморския басейн (например Власинското езеро, отводнявано от река Власина към Южна Морава). В пределите на Босилеградско обаче всички местни водни течения са насочени към басейна на Струма, което придава на района ясно изразена хидрографска насоченост.

6. Основни речни басейни и хидротехнически обекти

Пространствената организация на хидрографската мрежа е представена на Фиг. 4 (хидрографска схема на района). Главната хидрографска ос е долината на река Драговищица, в която се събира оттокът от притоците Божичка, Любатска и Бистрица, спускащи се от обкръжаващите планински масиви.

Долината на Драговищица играе ролята на основна хидрографска ос в района. Тя обединява оттока от голям брой къси, но енергични планински притоци, които се спускат от стръмните склонове на съседните масиви. Поради това водосборът ѝ има ясно изразен планински характер

(Фиг. 3). След Босилеград реката тече на югоизток между северните склонове на Милевска планина и Дукат и напуска територията на страната в близост до границата с България.

6.1. Басейн на река Драговищица

Река Драговищица (фиг. 3) е главната отводнителна артерия на изследваната територия. Тя се формира при Босилеград, на около 787 m н.в., от сливането на реките Божичка и Любатска. Нейният басейн обхваща значителна част от сръбската част на Краище и е оформен от високите планински масиви на Варденик, Бесна кобила, Дукат, Милевска планина и съседните възвишения.



Фигура 3 - Босилеград в долинното разширение на река Драговищица. Котловината е оформена в неогенски езерни седименти, запълващи понижението в кристалинния цокъл. Тесните, дълбоко врязани долини в обкръжаващите склонове свидетелстват за интензивна линейна ерозия. Тук се осъществява сливането на Божичка и Любатска река, поради което Босилеградската котловина е централният хидрографски възел на района.

6.2. Басейн на река Бистрица (Бистрарска)

Река Бистрица (Бистрарска) се формира от сливането на два основни изворни притока. Южният извор, разположен под върховете Билин и Бела вода, образува Голема река. Северният извор извира под Бела вода в планината Дукат и дава начало на Беловодския поток, който по-надолу прераства в Ярешничката река. В местността Белута Ярешничката река се съединява с Голема река и от това сливане се формира Бистрица, която се влива в Драговищица при граничния пункт Рибарци.

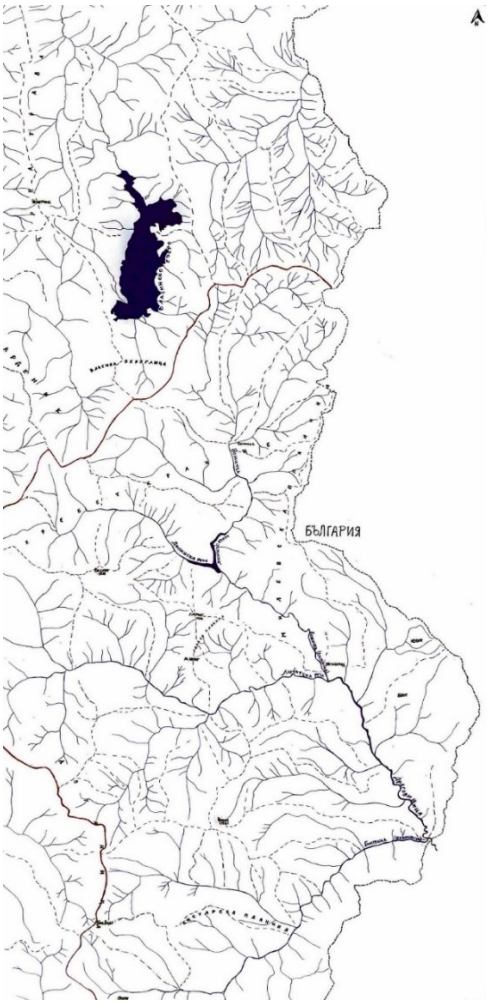
Лявата страна на водосбора на Бистрица се формира от Граничните планини и Белим, докато северният клон е свързан с масива на Дукат, включително районите Доганичка и Църноок. Геоложката основа на долината е разнообразна — гнайси в северния край, микашисти в района на Бела вода и андезити на юг.

6.3. Басейн на река Божичка

Водосборът на река Божичка включва едноименната река и нейните основни притоци. Изворите ѝ се намират под върховете Кървав камик, Плоча, Оштрика и Бандера, а в басейна ѝ се включват също Топлодолската река и Лисинската река.

Геоложката основа на този водосбор е изградена от микашисти, гранит-гнайси и диабаз-филитоидна формация, а в речните долини се срещат наслаги от чакъл, пясък и глина. Най-разпространени са планинските черноземи и кафявите горски почви, а по влажните крайречни участъци - блатни и торфени почви. В рамките на горскостопанската единица „Босилеград“ водосборът на Божичка, заедно с Лисинската река, обхваща площ от 1042,29 ha и има направление северозапад–югоизток („Србија шуме“, 2023).

В рамките на басейна на река Божичка особено място заема акумулацията „Лисина“ (вж. т. 6.5), разположена при вливането на реките Божичка и Лисинска, в района на село Долна Лисина. Тя представлява ключов хидротехнически елемент именно в пределите на Божичкия водосбор.



Фигура 4 - Хидрографска схема на Босилеградско Краище. Гъстата речна мрежа от дендритов тип се събира в системата на река Драговищица, която напуска територията на югоизток към България (Егейски водосборен басейн, басейн на Струма). С прекъсната линия са означени вододелните била; в северозападния ъгъл е Власинското езеро.

6.4. Басейн на река Любатска

Водосборът на река Любатска се формира от редица извори и потоци, свързани с планините Мусулска, Дукат и съседни ридове и височини. Реката приема при Долна Любата река Дукатска, а при Босилеград се съединява с Божичката река, образувайки Драговищица.

Северният приток на Любатска е свързан с планините Мусулска и Глошка, западният - с Просеченица, Шупля падина и Патарица, а южният - с Дукат, откъдето извира Дукатската река. В литоложко отношение тук са разпространени микашисти, гранит-гнайси и диабаз-филитоидни скали, което се отразява и върху почвеното разнообразие. В рамките на горскостопанската единица

„Босилеград“ водосборът на Любатска, заедно с реките Дукатска, Козодолска и Черна река, обхваща площ от 2251,86 ha и има направление запад–изток („Србија шуме“, 2023).

6.5. Хидроенергиен комплекс „Лисина“

Хидроенергиен комплекс „Лисина“ (Лисинско езеро) е изкуствен водоем, разположен в североизточната част на община Босилеград, в района на село Долна Лисина. Той е изграден върху течението на Божичката река като част от хидротехническата система, свързана с Власинския хидроенергиен комплекс и служи за акумулиране и регулиране на водните ресурси от водосбора на Божичката и Лисинската река, както и на по-малки планински потоци от склоновете на Дукат, Варденик и Бесна кобила.

Към язовира се насочва и част от водите на река Любатска чрез водохващания и канална система, с което се увеличава постъпващото количество вода и се повишава ефективността на хидроенергийната система. Поройният характер на водните течения и силно разчлененият релеф обуславят бързо формиране на повърхностен отток и значителни сезонни колебания на водните количества. В този смисъл Лисинското езеро има значение не само като инженерно съоръжение, но и като ключов елемент в съвременната хидрографска организация на района (Фиг. 5).



Фигура 5 - Язовир „Лисина“ (Лисинско езеро) в долината на река Божичка. Язовирната стена е изградена в тесен пролом, всечен в устойчиви кристалинни шисти — белег за интензивна дълбочинна ерозия, подпомогната от неотектонско издигане. Езерото е изградено при сливането на Божичка и Лисинска река и чрез канална система допълва Власинския хидроенергиен комплекс.

7. Взаимовръзка между релефа и хидрографската мрежа

Между релефа и хидрографската мрежа в Краище съществува пряка и ясно изразена зависимост. Силно разчлененият планински релеф, големите денивелации и литоложката пъстрота създават благоприятни условия за формиране на гъста речна мрежа с къси, стръмни и поройни притоци. От своя страна речната ерозия усилва разчлененността на релефа и формира характерните долинни системи и склонови форми.

Речните долини са основните морфодинамични оси на територията. Те не само организират оттока, но и структурират вътрешното пространство на района, като разделят отделните планински масиви и свързват високите вододелни части с котловинните понижения. Босилеградската котловина представлява естествено морфохидрографско средище, към което са ориентирани основните долинни разширения и в чийто район се осъществява сливането на ключови речни артерии.

Особено показателен е фактът, че вододелните линии в района до голяма степен съвпадат с главните билни части на Бесна кобила, Варденик, Дукат и Милевска планина. Това означава, че морфоструктурната рамка на територията определя организацията на речната мрежа, а хидрографската система от своя страна дооформя релефа чрез постоянна ерозионна дейност. Следователно сръбската част на Краище може да бъде определена като ясно изразена морфохидрографска област, в която релефът и хидрографската система са функционално и генетично свързани.

8. Заключение

Проведеният морфохидрографски и геолого-морфоструктурен анализ на сръбската част на Краище показва, че изследваната територия представлява ясно изразена планинско-долинна система с висока степен на релефна разчлененост. Основна морфохидрографска ос на района е басейнът на река Драговищица, който чрез притоците Божичка, Любатска и Бистрица обединява повърхностния отток в единна водосборна система, ориентирана към Егейския водосборен басейн.

Главните планински дялове - Бесна Кобила, Варденик и Дукат - изпълняват важна вододелна и морфографска функция. Те очертават основните природни граници на изследваната територия и участват в разграничаването на оттока между Черноморския и Егейския водосборен басейн. Значителните относителни височини, стръмните склонове и гъстата долинна мрежа обуславят активна ерозионна динамика и предпоставки за пороен режим на речните течения.

Геоложката структура, изразена в редуване на устойчиви литоложки комплекси - гранитоиди и кристалинни шисти - с по-слабо устойчиви скални формации, оказва съществено влияние върху

пространственото развитие на релефа, посоката на долинното врязване и конфигурацията на хидрографската мрежа. В този смисъл съвременният релеф на района е резултат от взаимодействието между морфоструктурната основа, литоложкия състав и екзогенните релефообразуващи процеси.

Използвана литература:

Antić, M., Peytcheva, I., von Quadt, A., Kounov, A., Trivić, B., Serafimovski, T., Tasev, G., Gerdjikov, I., & Wetzel, A. (2016). Pre-Alpine evolution of a segment of the North-Gondwanan margin: Geochronological and geochemical evidence from the central Serbo-Macedonian Massif. Gondwana Research, 36, 523–544.

Antić, M. D., Kounov, A., Trivić, B., Spikings, R., & Wetzel, A. (2017). Evidence of Variscan and Alpine tectonics in the structural and thermochronological record of the central Serbo-Macedonian Massif (south-eastern Serbia). International Journal of Earth Sciences, 106, 1665–1692.

Babović, M., & Cvetković, D. (1976). Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, list Trgovište sa Radomirom. Savezni geološki zavod.

Babović, M., Roglić, Č., Avramović, V., & Marić, S. (1977). Tumač za Osnovnu geološku kartu SFRJ 1:100 000, list Trgovište sa Radomirom. Savezni geološki zavod.

Belij, S., Nešić, D., & Milovanović, B. (2008). Savremeni geomorfološki procesi i oblici reljefa periglacijalne sredine Stare planine i njihova zaštita. Zaštita prirode, 59(1–2), 19–50.

Bončev, E. (1958). Über die tektonische Ausbildung der Krajštiden (Krajštiden-Lineament). Geologie, 7(3–6), 409–419.

Kounov, A., Burg, J.-P., Bernoulli, D., Seward, D., & Antić, M. (2025). Tectonic evolution of the Kraishte area (southwestern Bulgaria and southeastern Serbia): An overview. Geologica Balcanica, 54(1), 37–89.

Kounov, A., Seward, D., Burg, J.-P., Bernoulli, D., Ivanov, Z., & Handler, R. (2010). Geochronological and structural constraints on the Cretaceous thermotectonic evolution of the Kraishte zone, western Bulgaria. Tectonics, 29, TC2002.

Leščešen, I., Pantelić, M., & Dolinaj, D. (2019). Morphological characteristics of Lake Vlasina (South-East Serbia). Water Research and Management, 9(3–4), 37–41.

Milanov, G. (2016). Naselja opštine Bosilegrad. Bosilegrad.

Milošević, M. V., Milivojević, M., & Ćalić, J. (2007). Tufuri Vlasine i Krajišta / Earth hυmocks in the regions of Vlasina and Krajište, Southern Serbia. Glasnik Srpskog geografskog društva, 87(1), 39–50.

Ranđelović, V. N., Zlatković, B. K., Milosavljević, V. N., & Ranđelović, N. V. (2008). The endemic flora of Bosilegrad surroundings (Krajište region) in SE Serbia. *Phytologia Balcanica*, *14*(3), 367-375.

Zagorchev, I. (2001). Introduction to the geology of SW Bulgaria. Geologica Balcanica, 31(1–2), 3–52.

Zagorchev, I. (2006). Kraishtides (Kraištiden). Geologica Balcanica, 35(3–4), 63–90.

Бончев, Е. (1936). Опитъ за тектонска синтеза на Западна България. Geologica Balcanica, 2(1), 5–48.

Димитров, Стр., & Димитров, Ц. (1931). Указание за младокимерската фаза от алпидското планинообразуване в Югозападна България. Списание на Българското геологическо дружество, 3(3), 65–74.

Загорчев, И. (1984). Роль надвигов в альпийском строении Краиштид. Geologica Balcanica, 14(4), 37–64.

Иванов, Ж. (2017). Тектоника на България. Университетско издателство „Св. Климент Охридски“.

ЈП „Србијашуме“. (2025). Извод из ОГШ за ГЈ „Босилеград“ (2024–2033). ШГ „Врање“, ШУ „Босилеград“.

ОСНОВНИ ПОЛОЖЕНИЯ В MESH ТЕХНОЛОГИЯТА – ПЕРСПЕКТИВИ ЗА РАЗВИТИЕ

Цвета Ивана Бикова, Велин Кралев

Югозападен университет „Неофит Рилски“ – Благоевград, ул. Иван Михайлов, 66

РЕЗЮМЕ

Настоящата статия разглежда основните принципи и развитие на безжичните меш мрежи (WMN), които се характеризират с директна свързаност между възлите и висока отказоустойчивост. Анализирани са архитектурните модели на WMN, както и ключови аспекти, като маршрутизиращи протоколи, управление на ресурсите и сигурността, а също така и енергийна ефективност. Представена е базова класификация на основните протоколи и използването на машинно обучение за оптимизация на мрежовите ресурси. Разгледани са различни аспекти на технологията, като сигурност, ограничен капацитет и възникващи проблеми с мащабируемостта. Представени са съвременни решения, като многослойни системи за сигурност и технологии за добив на енергия. Статията обхваща и практическите приложения на WMN в градската инфраструктура, индустриалния мониторинг и IoT системите. Разгледани са бъдещи перспективи за развитие на изследването, базирани на заключението, че WMN се утвърждава като основен елемент на интелигентните комуникационни екосистеми.

КЛЮЧОВИ ДУМИ: безжични меш мрежи, mesh топология, маршрутизиращи протоколи, управление на ресурси, машинно обучение, енергийна ефективност.

FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF MESH TECHNOLOGY – FUTURE DEVELOPMENT PERSPECTIVES

Tsveta Ivana Bikova, Velin Kralev

South-West University "Neofit Rilski" – 66 Ivan Mihailov Str., Blagoevgrad, Bulgaria

ABSTRACT

This paper examines the fundamental principles and development of Wireless Mesh Networks (WMNs), which are characterized by direct connectivity between nodes and high fault tolerance. The

architectural models of WMNs are analyzed, along with key aspects such as routing protocols, resource management, security, and energy efficiency. A basic classification of routing protocols is presented, as well as the application of machine learning for optimizing network resources. Various technological challenges are discussed, including security vulnerabilities, limited capacity, and emerging scalability issues. Modern solutions are introduced, such as multilayer security systems and energy harvesting technologies. The paper also explores practical applications of WMNs in urban infrastructure, industrial monitoring, and Internet of Things (IoT) systems. Future research perspectives are outlined, based on the conclusion that WMNs are becoming a fundamental component of intelligent communication ecosystems.

KEYWORDS: wireless mesh networks, mesh topology, routing protocols, resource management, machine learning, energy efficiency.

1. Въведение

Мрежестата или още mesh топологията е мрежова конфигурация, която се характеризира с пряка свързаност между всяко от устройствата, участващи в мрежата (Jiang, 2015), като осигурява множество различни маршрути за пренос на данни. При този начин на свързаност, всеки възел може да комуникира директно с всеки друг възел, намиращ се в обхвата на неговото лично пространство (Personal Operating Space – POS). Това осигурява на мрежестата (mesh) топология висока отказоустойчивост и ефективност, мащабируемост и сигурност. Развитието на интернет на нещата (Internet of Things – IoT) и все по-честото и използване в различни дигитални технологии, включително битова техника, превозни средства и т.н., завиши необходимостта от непрекъсната, надеждна и високоскоростна динамична свързаност. Това даде тласък за развитие на безжичните mesh технологии и доведе до необходимост от систематизиране на съществуващите решения и идентифициране на недостатъците им.

В секция 2 на настоящото изследване са разглежда в детайл същността на безжичните mesh мрежи (Wireless Mesh Networks, WMN), също наречени безжични многосвързани мрежи. Засегнати са аспекти, важни за проектирането на WMN и осигуряването на ефективността им, като подходи за маршрутизиране, ефективно разпределение на ресурсите, управление на преносимостта, сигурността, както и начини за оптимизиране на количеството използвана енергия (Chai & Zeng, 2021). В секция 3 са представени няколко приложения на WMN, а в секция 4 е наблегнато на текущи проблеми в областта, начини за тяхното преодоляване и бъдещи перспективи на технологията.

2. Безжични меш мрежи (WMN)

2.1. Архитектура на безжичните меш мрежи (WMNs)

Архитектурата на безжичните многосвързани мрежи се състои от два типа устройства – mesh рутери и mesh клиенти (Akyildiz et al., 2005). Гръбнака на мрежата се състои от множество стационарни mesh рутери, които са свързани безжично един с друг (Al-Karaki et al., 2017). mesh клиентите могат да бъдат преносими, например лаптопи, мобилни телефони и други, или стационарни – домашни компютри (Al-Karaki et al., 2017). Те могат също да изпълняват ролята на рутер, но не могат да извършват функциите на мост или шлюз. В повечето случаи имат само един безжичен интерфейс, за разлика от mesh рутерите, които обикновено поддържат по 2-3, или 4-7 безжични интерфейси (Akyildiz et al., 2005).

- **Инфраструктурни безжични меш мрежи -** този тип архитектура на мрежата е изграден от mesh рутери, които формират инфраструктура, към която mesh клиенти могат да се свързват (Akyildiz et al., 2005).
- **Клиентски безжични меш мрежи -** те са изградени от mesh клиенти. Този вид архитектура позволява установяването на peer to peer мрежи между клиентски устройства. Мрежата е изградена от mesh клиенти, които осигуряват достъп до приложения и действат и като mesh рутери (Akyildiz et al., 2005).
- **Хибридни безжични меш мрежи** – тази архитектура е комбинацията от infrastructure и client meshing. mesh клиентите могат да получат достъп до мрежата както и чрез mesh рутерите, така и директно чрез други клиентски устройства. (Akyildiz et al., 2005).

Общо казано WMNs могат да бъдат приети като междинния подход между WLAN (Wireless Local Area Networks – безжични локални мрежи) и MANETs (Mobile ad-hoc Networks – мобилни разпределени мрежи). WMNs могат да съдържат както и статичните точки за достъп от WLANs, така и безжичната мулти-хоп комуникация от MANETs. Това постига широка покривност с голяма бързина на предаване и висока пропускателна способност, т.е. WMNs подобряват ползите и намаляват недостатъците на MANETs и WLANs. Поради тези прилики с WLANs и MANETs, при създаването на технологията, WMNs използват протоколи за маршрутизация, базирани на техните (Al-Karaki et al., 2017).

2.2. Традиционна класификация на маршрутизиращите протоколи за безжични меш мрежи

Традиционната класификация на протоколите за маршрутизация на данни при WMNs, приобщена от маршрутизирането при MANETs е разделена на три типа – проактивен, реактивен и

хибриден подход. Тази класификация се базира на времето, необходимо за установяване на път за пренос на данните (Al-Karaki et al., 2017).

- **Проактивно (таблично базирано) маршрутизиране** – съхраняват информация за пътищата от всеки възел до всеки друг възел. Този подход намалява закъснението при откриване на маршрути, но увеличава overhead поради периодичните актуализации (Selim et al., 2025).
- **Реактивно (при поискване) маршрутизиране** – намират оптималния път, когато е необходимо. Това намалява overhead, но може да увеличи първоначалното време, необходимо за установяване на път (Selim et al., 2025).
- **Хибридно маршрутизиране** – хибридните маршрутируеми протоколи обединяват характеристики на реактивни и проактивни протоколи, за да балансират недостатъците им (Selim et al., 2025).

2.3. Класификация на маршрутизиращите протоколи за безжични меш мрежи

Според Al-Karaki и съавтори (2017) тази класификация не е подходяща за WMN (безжични мрежи тип mesh), поради съществените различия между MANET и WMN. Авторите предлагат алтернативна класификация на протоколите за маршрутизиране, базирана на три основни фактора: дизайн на протокола (protocol design), функциониране на протокола (protocol operation) и дизайн на възлите (node design), като всеки от тях включва допълнителни подкатегории.

По отношение на дизайна на протокола се разграничават два вида: протоколи със слоеста архитектура (layered design protocols) и протоколи с кръстосан (междуслоен) дизайн (cross-layered design protocols). При функционирането на протокола се обособяват следните групи: опортюнистични протоколи (opportunistic protocols), ограничени протоколи (constrained protocols), протоколи, съобразени с мобилността (mobility-aware protocols), както и протоколи, базирани на качество на обслужване (QoS-based routing protocols). Последната група включва допълнителни подкатегории като протоколи, отчитащи загубата на данни (data loss protocols), протоколи, свързани с натоварването на трафика (traffic-load protocols) и протоколи, съобразени със закъснението (delay-aware protocols).

2.4. Разпределение на ресурсите в безжични меш мрежи

Ефикасното и динамично разпределение на ресурси представлява съществено предизвикателство при проектирането на съвременни безжични mesh мрежи. Поради бързото развитие на WMN (Wireless Mesh Networks) традиционните подходи за ефективно управление на ресурсите се оказват ограничени (Ajibola et al., 2025). В тази връзка (Ajibola et al., 2025) разглеждат

пет основни подхода, базирани на машинно обучение, които могат да се прилагат при разпределението на ресурси в безжични комуникационни мрежи (WCN – Wireless Communication Networks). Това са: федеративно обучение (Federated Learning, FL), федеративно обучение с подсилване (Federated Reinforcement Learning, FRL), графови невронни мрежи (Graph Neural Networks, GNN), дълбоко обучение с подсилване (Deep Reinforcement Learning, DRL), както и комбиниран подход, съчетаващ GNN и DRL (GNN-based DRL).

2.5. Сигурност в безжичните меш мрежи

Липсата на централизирана инфраструктура и мулти-хоп същността на безжичните mesh мрежи (WMN) ги правят уязвими към различни видове атаки (Al-Anzi, 2022). Въпреки че съществуват множество подходи за тяхната защита, повечето от тях се фокусират върху конкретно ниво от модела на отворените системи (OSI). В същото време безжичните многосвързани мрежи са уязвими към атаки на различни слоеве на OSI модела, поради наличието на междуслойни (cross-layer) взаимодействия (Al-Anzi, 2022). Един ефективен подход за анализиране и наблюдение на атаки, възникващи на различни нива, е използването на многослойни системи за откриване на проникванията (multilayer IDS – Intrusion Detection Systems). Тези системи функционират на няколко слоя от OSI модела и могат да засичат атаки като: подправяне на MAC адреси (MAC spoofing) на слоя за достъп до средата; атаки тип „черна дупка“ (black hole), „сива дупка“ (gray hole) и маршрутизационни цикли (routing loop) на мрежовия слой; отвличане на сесии (session hijacking) на сесийния слой; както и SYN flood атаки на транспортния слой (Al-Anzi, 2022).

2.6. Енергоспестяване и добив на енергия в безжичните меш мрежи

Енергоспестяването и добиването на енергия (Energy Harvesting – EH) са важни аспекти при проектирането на безжични многосвързани мрежи, поради развиването на green computing и green communication. Един начин за енергоспестяване е възможността на устройствата да преминават между спящ или активен режим (Chai & Zeng, 2021).

EH е начин за добиване на енергия от околната среда (слънчева, механична, вятърна енергия) или други източници на енергия (топлината на тялото, удър на крак и др.), превърнати в електрическа енергия (Fahmi, 2020, p42, 43). Прекъсващата и непредсказуема природа на тези начини за добиване на енергия прави трудно продължителното и стабилното захранване на устройства. Поради тази причина конвенционалните методи за EH са приложими само в специфични среди (Li eta al., 2020).

Радиочестотното добиване на енергия (RF EH) добива по-голяма популярност, защото предлага алтернативен, но все пак природосъобразен похнод (Ibrahim et al., 2022).

3. Приложение на безжичните меш мрежи

3.1. Градска свързаност и мрежи за обществен достъп

Безжичните меш мрежи се утвърждават като ключова технология за изграждане на мащабируема и надеждна свързаност в различни сценарии. Едно от основните им приложения е осигуряването на широколентов достъп до интернет в градски среди и труднодостъпни райони, където полагането на кабели е икономически неизгодно. Според (Akyildiz et al., 2005), WMNs предлагат гъвкаво решение за „последната миля“ (last-mile connectivity), позволявайки на потребителите да споделят ресурси чрез динамична самоорганизация на възлите. Тази архитектура е фундаментална за развитието на интелигентни градове, където мрежовата топология трябва да бъде едновременно устойчива и адаптивна (Jiang, 2015).

3.2. Индустриален мониторинг и енергийно ефективни IoT системи

В индустриалния сектор и сферата на Интернет на нещата (IoT), меш мрежите играят критична роля чрез интегрирането на сензорни системи. (Fahmi, 2020) подчертава значението на управлението на енергията в тези мрежи, особено при приложения, изискващи мониторинг на околната среда или индустриална автоматизация. В контекста на съвременните изисквания за устойчивост, акцентът се измества към „зелени“ меш мрежи, които използват възобновяеми източници и интелигентно планиране на връзките за оптимизиране на консумацията (Chai & Zeng, 2021; Guan et al., 2020). Потенциалът на тези системи се разширява още повече чрез технологии за RF EH, които позволяват на мрежовите възли да функционират автономно за дълги периоди (Ibrahim et al., 2022).

3.3. Комуникации от следващо поколение и интелигентно управление на ресурсите

Бъдещето на безжичните меш мрежи е тясно свързано с комуникационните стандарти от следващо поколение, като IEEE 802.11be (Wi-Fi 7). Според (Liu et al., 2025), функционалността с най-значимо въздействие върху безжичните многосвързани мрежи е т.нар. Multi-Link Operation (MLO). Тя позволява предаването и приемането на данни от един и същ поток на трафик едновременно през множество радио интерфейси, като същевременно използва всички налични ресурси в 2.4 GHz, 5 GHz и 6 GHz спектъра. Това технологично нововъведение значително подобрява стабилността и бързината на WMN, осигурявайки по-висока пропускателна способност и ниско закъснение, които са от съществено значение за мултимедийни приложения в реално време.

Освен това, внедряването на техники за машинно обучение при разпределение на ресурсите и оптимизиране на маршрутизиращите протоколи позволява на WMNs да поддържат висока

производителност дори при динамични условия и мобилност на възлите (Ajibola et al., 2025; Selim et al., 2025). Тази еволюция превръща меш мрежите в гръбнак на бъдещите интелигентни комуникационни екосистеми (Chai, Zeng & Liu, 2024).

4. Дискусия

4.1. Предизвикателства и възможни решения

В тази секция са разгледани текущи проблеми в областта, и някой бъдещи перспективи за WMN.

Таблица 1 – Предизвикателства и възможни решения

Проблем	**Подробности**	**Възможни решения**	**Източник**
Сигурност	Уязвимост към DoS атаки, подслушване и несигурни протоколи поради децентрализирания характер.	Дизайн на IDS системи и олекотени алгоритми за криптиране	(Al-Anzi, 2022); (Li et al., 2020)
Управление на енергията	Бързо изчерпване на батериите при многоскокова комуникация и ретранслиране на пакети.	Интегриране на RF Energy Harvesting и "зелени" протоколи за планиране на връзките.	(Fahmi, 2020); (Ibrahim et al., 2022); (Guan et al., 2020)
Пропускателна способност и честотна лента	Смущения в гъсти мрежи, водещи до намаляване на капацитета на всеки възел.	Използване на Wi-Fi 7 (MLO) за агрегиране на спектъра и интелигентно разпределение на ресурсите чрез Machine Learning.	(Liu et al., 2025); (Ajibola et al., 2025)
Латентност	Закъснения при пренос в реално време, причинени от множество скокове и	Динамичен избор на оптимални пътища чрез адаптивни протоколи	(Selim et al, 2025); (Al-Karaki et al, 2017)

	неефективно маршрутизиране.	(MANET/WMN) и AI оптимизация.	
Мащабируемост	Трудности при поддържане на стабилност и производителност с нарастване броя на възлите.	Йерархично маршрутизиране и динамична реконфигурация на топологията.	(Akyildiz et al., 2005); (Jiang, 2015)

4.2. Бъдещи перспективи за безжичните меш мрежи (WMNs)

Няколко бъдещи перспективи за WMN са представени в този раздел.

- **Интегрирана космическо-въздушно-наземна мрежа (SAGIN) -** SAGIN е решение за справяне с многобройните потребители и заявки за услуги, с които не могат да се справят наземните безжични мрежи, тъй като те имат лимитиран капацитет и обхват и не могат да осигуряват услуги в глобален мащаб. SAGIN има три слоя – космически, въздушен и наземен слой. Космическият слой има голямо покритие, но дълга латентност на сигнала. Въздушният слой има широко покритие, но по-малък капацитет и нестабилни връзки. Наземната мрежа има ниска латентност, но ограничено териториално покритие. WMN могат да бъдат интегрирани в технологиите за SAGIN, тъй като позволява гъвкава топология, която се адаптира към мобилността на различни възли (Chai, Zeng & Liu, 2024).
- **Интернет на нещата (IoT)** - WMN могат да помогнат с разширяването на обхвата на IoT устройствата чрез мулти-хоп комуникация, чрез която се увеличава броят на свързаните IoT устройства (Chai, Zeng & Liu, 2024).
- **Периферни изчисления (EC)** - EC представлява преместване на обработката на данни от централизиран облак към периферията на мрежата, за да намали латентността, създавайки децентрализирана мрежа. WMN технологиите могат да бъгат интегрирани при EC, поради своята децентрализирана същност (Chai, Zeng & Liu, 2024).

5. Заключение

Настоящият обзор потвърждава, че безжичните меш мрежи (WMN) заемат много важно място в еволюцията на съвременните комуникации, предлагайки гъвкавост, мащабируемост и устойчивост, които традиционните архитектури трудно постигат. Чрез систематизиране на съществуващите

решения беше установено, че интеграцията на нови стандарти като Wi-Fi 7 и функционалности като Multi-Link Operation (MLO) фундаментално решават дългогодишните проблеми, свързани с капацитета и латентността в гъсти мрежови среди.

Изследването показва, че бъдещето на WMN не е свързано само с по-висока скорост, но и с интелигентно управление на ресурсите. Прилагането на техники за машинно обучение и внедряването на „зелени“ стратегии за събиране на енергия (RF EH) превръщат меш мрежите в автономни системи, способни да поддържат критични инфраструктури в интелигентните градове и в индустрията. Същевременно, децентрализираната природа на тези мрежи изисква нови подходи към сигурността, като многослойни системи за засичане на пробиви (multilayer IDSs), които да гарантират интегритета на данните при cross-layer взаимодействия.

В заключение, безжичните многосвързани мрежи престават да бъдат просто алтернативно решение за свързаност и се превръщат в гръбнак на интегрираните екосистеми от следващо поколение (SAGIN), обединяващи наземни, въздушни и космически комуникации. Бъдещите изследвания трябва да се фокусират върху по-нататъшната оптимизация на тези хибридни структури, за да се отговори на нарастващите нужди на глобалния Интернет на нещата (IoT).

Финансиране: Настоящото изследване е финансирано от Фонд „Научни изследвания“ по проект № КП-06-Н100/7 „Интелигентни адаптивни подходи за подпомагане на началното образование на ученици със специални образователни потребности чрез машинно обучение и роботизирани технологии“.

Използвана литература:

Akyildiz, I. F., Wang, X., & Wang, W. (2005). Wireless mesh networks: a survey. Computer networks, 47(4), 445-487.

Chai, Y.; Zeng, X. J. The development of green wireless mesh network: A survey. . J. Smart. Environ. Green. Comput. 2021, 1, 47-59. http://dx.doi.org/10.20517/jsegc.2020.05

Jiang, R. (2015, November). A review of Network Topology. In 4th International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (pp. 1167-1170). Atlantis Press.

Al-Karaki, J.N., Al-Mashaqbeh, G.A. and Bataineh, S. (2017) ‘Routing protocols in wireless mesh networks: a survey’, Int. J. Information and Communication Technology, Vol. 11, No. 4, pp.445–495.

Selim, I. M., Abdelrehem, N. S., Alayed, W. M., Elbadawy, H. M., & Sadek, R. A. (2025). MANET Routing Protocols' Performance Assessment Under Dynamic Network Conditions. Applied Sciences, 15(6), 2891. https://doi.org/10.3390/app15062891

Ajibola, Opeyemi & Ajibowu, Samuel & Osobukola, Adewole & Asafa, Mubarak & Samson, Joseph & Babatunde, Surajudeen. (2025). Machine Learning Techniques for Resource Allocation In Wireless Communication Networks: a Review. Journal of Computer Sciences and Informatics. 2. 229 - 238. 10.5455/EJCSI.20250530124623.

S. Guan, J. Zhang, Z. Song, B. Zhao and Y. Li, "Energy-Saving Link Scheduling in Energy Harvesting Wireless Multihop Networks With the Non-Ideal Battery," in IEEE Access, vol. 8, pp. 144027-144038, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014645

Fahmy, H. M. A. (2020). Wireless sensor networks: Energy harvesting and management for research and industry. Springer Nature.

Ibrahim, H. H., Singh, M. J., Al-Bawri, S. S., Ibrahim, S. K., Islam, M. T., Alzamil, A., & Islam, M. S. (2022). Radio Frequency Energy Harvesting Technologies: A Comprehensive Review on Designing, Methodologies, and Potential Applications. Sensors, 22(11), 4144. https://doi.org/10.3390/s22114144

Li, L., Zhao, X., Geng, S., Zhang, Y., & Zhang, L. (2020). Robust Beamforming Design for SWIPT-Based Multi-Radio Wireless Mesh Network with Cooperative Jamming. Information, 11(3), 138. https://doi.org/10.3390/info11030138

Sharma, B., & Singh, A. (2019). Routing protocol for wireless mesh network-a survey. Adv. Appl. Math. Sci, 18(8), 1-12.

Al-Anzi, F. S. (2022). Design and analysis of intrusion detection systems for wireless mesh networks. Digital Communications and Networks, 8(6), 1068-1076.

X. Liu, Y. Dong, Y. Li, Y. Lin and M. Gan, "IEEE 802.11be Wi-Fi 7: Feature Summary and Performance Evaluation," in IEEE Communications Standards Magazine, doi: 10.1109/MCOMSTD.2025.3640281.

Chai, Y., Zeng, X. J., & Liu, Z. (2024). The future of wireless mesh network in next-generation communication: a perspective overview. Evolving Systems, 15(4), 1635-1648.

MULTIDISCIPLINARY JOURNAL OF SCIENCE, EDUCATION AND ART
ISSN 1313 – 5236
HTTP://WWW.USB-BLAGOEVGRAD.SWU.BG

STUDY OF INCLUSIVE ELECTRON SCATTERING FROM ^{12}C NUCLEUS AND COMPARISON WITH EXPERIMENTALLY OBSERVED DATA

Boyana Georgieva[a], Martin Ivanov[a,b], Anton Antonov[b]

[a] *South-West University "Neofit Rilski", Str. "Ivan Mihaylov" 66, Blagoevgrad, 2700, Bulgaria*
[b] *Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Bulgarian Academy of Sciences, 1784 Sofia, Bulgaria*

ABSTRACT

In this work, we study inclusive electron scattering from the ^{12}C nucleus and compare our theoretical results with the available experimental data. The calculations are performed within the framework of the Coherent Density Fluctuation Model (CDFM). The CDFM is a theoretical approach in nuclear physics that provides a natural extension of the Relativistic Fermi Gas (RFG) model to finite nuclei. The successful test of the CDFM model for inclusive (*e,e′*) scattering gives us the confidence to further extend of its application to neutrino scattering processes.

KEYWORDS: electron–nucleus cross-sections, many-body theory, lepton-induced reactions, nuclear effects, scaling

1. Introduction

Leptons are elementary particles that do not interact via the strong force. They interact only via the electromagnetic force (charged leptons), the weak force, and gravity. Leptons may either carry one unit of electric charge (electron, muon, tau) or be electrically neutral (corresponding neutrinos). Moreover, all leptons, including the neutrinos, have antiparticles called antileptons. Together with quarks, leptons belong to the class of fundamental particles that form matter and, according to current understanding, possess no internal structure. Lepton-nucleus scattering is a process in which a lepton interacts with an atomic nucleus via the electromagnetic or weak force. The investigation of lepton-nucleus scattering provides important information about the internal structure of nucleons and nuclei.

When an electron is scattered from a nucleus and only the scattered electron is detected, while all other particles produced in the interaction remain undetected, the process is called inclusive electron scattering. The transferred energy ω is defined as the difference between the initial and final energy of the electron:

$$\omega = E - E', \tag{1}$$

where E and E' are the energies of the incident and outgoing electrons, respectively. A schematic representation of the inclusive scattering cross section as a function of the transferred energy ω is shown in Figure 1.

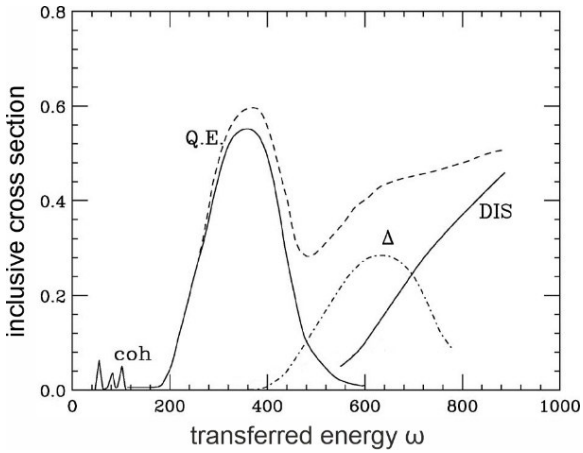


Figure 1 - Schematic representation of the inclusive electron scattering cross section as a function of the transferred energy ω

At low transferred energies ω, the inclusive electron scattering spectrum exhibits pronounced peaks corresponding to elastic scattering and inelastic transitions to discrete excited nuclear states. Elastic lepton-nucleus scattering occurs when the lepton is scattered without exciting the nucleus, i.e. the nucleus remains in its ground state. This type of scattering can be used to determine the nuclear radius and the nuclear charge distribution.

When the transferred energy becomes equal to or exceeds the nucleon binding energy, the electron may interact with an individual nucleon and transfer sufficient energy to eject it from the nucleus. As a result, a broad peak appears in the scattering spectrum. This process is not interpreted as a collective excitation, but rather as an almost free electron-nucleon scattering process occurring inside the nucleus. It is referred to as quasielastic (QE) scattering since it resembles elastic lepton scattering from a free nucleon.

Deep inelastic scattering (DIS) occurs at very large transferred energies. In this process, the electron interacts directly with a quark inside the nucleon. Therefore, deep inelastic scattering provides evidence for the quark structure of the nucleon.

At transferred energies below the DIS region, resonance excitations such as the Δ-resonance contribute to the scattering process, giving rise to an additional peak in the spectrum. In this case, the electron transfers enough energy to excite the nucleon without destroying its internal structure.

2. Scaling

Scaling in lepton-nucleus scattering is a phenomenon in which the experimental cross-section (or response function) depends on a single kinematic variable rather than independently on the transferred energy (ω) and momentum transfer (q), particularly in the QE region. The scaling function is defined in terms of the reduced cross section as:

$$f(q,\omega) = \frac{d^2\sigma/d\Omega\, dk'}{S(q,\omega)}, \tag{2}$$

where $S(q,\omega)$ contains the single-nucleon cross sections. At sufficiently large momentum transfer q, the function f exhibits scaling behavior and becomes dependent on a single variable, the quasielastic scaling variable:

$$\psi_{QE} = \pm\sqrt{\frac{1}{2T_F}\left(q\sqrt{1+\frac{1}{\tau}}-\omega-1\right)}\quad, \tag{3}$$

where T_F is the Fermi kinetic energy and τ is the dimensionless four-momentum transfer. The $\pm$ sign corresponds to energy transfers above or below the quasielastic peak.

Scaling of the **first kind** is observed when the reduced cross sections depend only on the scaling variable ψ and become independent of the momentum transfer q. Scaling of the **second kind** occurs when the reduced cross sections are independent of the nuclear mass number A. When both types of scaling are simultaneously satisfied, the phenomenon is referred to as **superscaling**.

3. Coherent Density Fluctuation Model

The theoretical concept of superscaling was first introduced within the framework of the Relativistic Fermi Gas (RFG) model (Alberico et al., 1988). Experimental data, however, exhibit noticeable deviations from the RFG predictions. In particular, the RFG approach fails to reproduce adequately the tail region of the quasielastic peak. Within this model, the nucleus is treated as an ideal Fermi gas, whereas experimental

observations indicate that real nuclei deviate considerably from such an idealized description. Consequently, the study of superscaling requires the use of more realistic nuclear models beyond the RFG approximation. One such model is the Coherent Density Fluctuation Model (Antonov et al., 1988; Antonov et al., 1993), which extends the Relativistic Fermi Gas model to describe realistic finite nuclear systems.

Within the framework of the CDFM model (Antonov et al., 2004; Antonov et al., 2006) the scaling function is given by:

$$f(\psi) = \int_0^{\frac{\alpha}{k_F|\psi|}} |F(x)|^2 f_{RFG}[\psi(x)]dx\,, \tag{4}$$

where the weight function is given by:

$$|F(x)|^2 = -\frac{1}{\rho_0(x)}\frac{d\rho(r)}{dr}\bigg|_{r=x}\,,\ \rho_0(x) = \frac{3A}{4\pi x^3}\,. \tag{5}$$

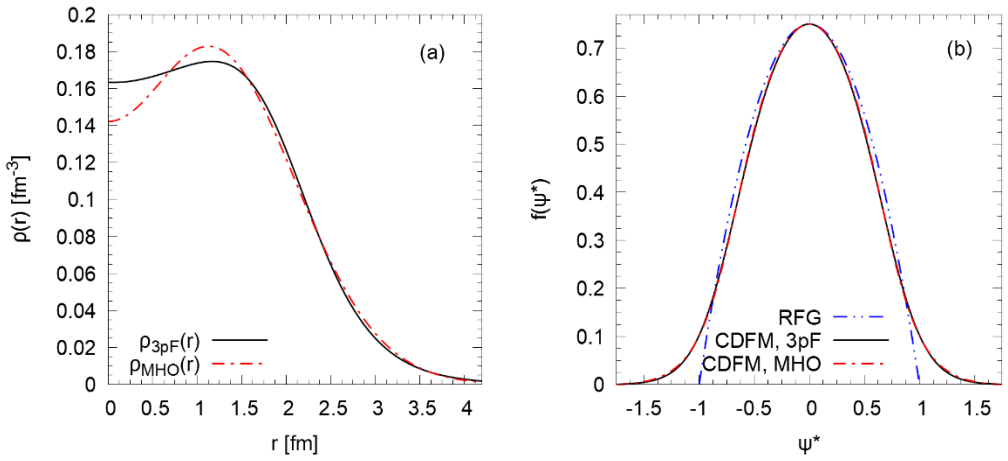


Figure 2 - The nucleon density distribution of the ^{12}C nucleus using two empirical proton density parametrizations: the modified harmonic oscillator (MHO) and the three-parameter Fermi (3pF) are presented in panel (a). The corresponding scaling functions obtained within CDFM and RFG models are given in panel (b).

The function $f_{RFG}[\psi(x)]$, where $\psi(x) = k_F x\psi/\alpha$, represents the scaling function in the RFG model:

$$f_{RFG}[\psi(x)] = \frac{3}{4}[1-\psi^2(x)]\left\{1+\left(\frac{xm_N}{\alpha}\right)^2\psi^2(x)\left[2+\left(\frac{\alpha}{xm_N}\right)^2-2\sqrt{1+\left(\frac{\alpha}{xm_N}\right)^2}\right]\right\}, \quad (6)$$

where m_N is the nucleon mass and $\alpha = (9\pi A/8)^{1/3} \approx 1.52A^{1/3}$. The Fermi momentum is calculated as:

$$k_F = \int_0^\infty |F(x)|^2 \, k_F(x)dx = \int_0^\infty |F(x)|^2 \frac{\alpha}{x}dx. \quad (7)$$

The empirical proton density distributions employed in this work are taken from Ref. (Patterson & Peterson, 2003). For the ^{12}C nucleus, two parametrizations are considered: the modified harmonic oscillator (MHO) and the three-parameter Fermi (3pF) form. We assume that for ^{12}C nucleus $\rho_n(r) = \rho_p(r)$. Figure 2 (a) presents the density distributions using MHO and 3pF parametrizations and the panel (b) depicts the corresponding CDFM scaling functions in comparison with the RFG scaling function. As can be seen, the differences between the two scaling functions obtained within CDFM are almost negligible. So that in the following results presented in this paper we use only the 3pF density parametrization for the calculations of the scaling function.

Before extending the CDFM approach to neutrino scattering, it is essential to test the model against inclusive (*e,e′*) scattering data. In Figure 3, the CDFM predictions for the inclusive (*e,e′*) cross sections are compared with the available experimental data. As can be seen from Figure 3, the CDFM model provides a very good description of the experimental data. The results obtained using the CDFM scaling function for the QE cross section and the total result are given by dashed and solid lines, respectively. Results using CDFM Δ-scaling function are given by dotted line. From Figure 3, it can be observed that the CDFM model effectively describes the experimental data.

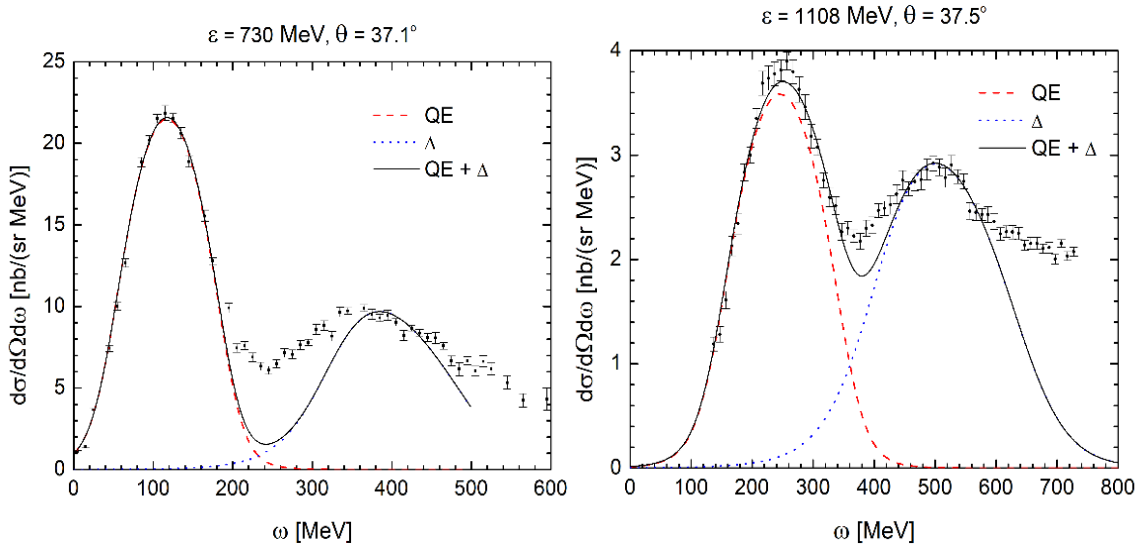


Figure 3 - The left panel corresponds to inclusive electron scattering on ^{12}C at incident energy $\varepsilon = 730$ MeV and scattering angle $\theta = 37.1°$, and the right one to inclusive electron scattering on ^{12}C at $\varepsilon = 1108$ MeV and $\theta = 37.5°$.

4. Conclusion

It is shown in our work that the CDFM model describes successfully the inclusive (e,e') cross section on the basis of the scaling variable ψ, of the empirical density distribution of protons used to determine the weight function $|F(x)|^2$, and of the corresponding scaling function $f(\psi)$. It is pointed out that the constructed realistic CDFM scaling function is an essential ingredient in this approach for the description of the processes of lepton scattering from nuclei. The successful test of the CDFM model for inclusive (e,e') scattering gives us the confidence to further extend of its application to neutrino-nucleus scattering.

Acknowledgment

This work was partially supported by the Bulgarian National Science Fund under Contract No. KP-06-N98/3.

References:

Alberico, W.M., Molinari, A., Donnelly, T.W., Kronenberg, E.L., & Van Orden, J.W., (1988). Scaling in electron scattering from a relativistic Fermi gas. Phys. Rev. C, 38, 1801.

Antonov, A.N., Hodgson, P.E., & Petkov, I.Z., Nucleon Momentum and Density Distributions in Nuclei (Clarendon Press, Oxford, 1988).

Antonov, A.N., Hodgson, P.E., & Petkov, I.Z., Nucleon Correlations in Nuclei (Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1993).

Antonov A.N., Gaidarov, M.K., Kadrev, D.N., Ivanov, M.V., Moya de Guerra, E., & Udias, J.M. (2004). Superscaling in nuclei: A search for scaling function beyond the relativistic Fermi gas model. Phys. Rev. C, 69, 044321.

Antonov, A.N., Ivanov, M.V., Gaidarov, M.K., Moya de Guerra, E., Caballero, J.A., Barbaro, M.B., Udias, J.M., & Sarriguren, P. (2006). Superscaling analyses of inclusive electron scattering and their extension to charge-changing neutrino cross sections in nuclei. Phys. Rev. C, 74, 054603.

Patterson, J., & Peterson, R. (2003). Empirical distributions of protons within nuclei, Nucl. Phys. A, 717, 235.

ИНТЕРАКТИВНИЯТ УЧЕБЕН ЕКСПЕРИМЕНТ В ОБУЧЕНИЕТО ПО ХИМИЯ И ФИЗИКА: СЪВРЕМЕННИ ПОДХОДИ, ДИГИТАЛНА ТРАНСФОРМАЦИЯ И ОБРАЗОВАТЕЛНИ ПЕРСПЕКТИВИ

Евел Комаров, Дамяна Грънчарова

Югозападен университет "Неофит Рилски", ул. „Иван Михайлов“ 66, Благоевград, 2700, България

РЕЗЮМЕ

Настоящото изследване анализира ролята на интерактивния учебен експеримент в обучението по химия и физика като ключов компонент на съвременното STEM образование. Акцентът е поставен върху неговата същност като педагогически подход, който трансформира традиционния модел на преподаване чрез активно включване на учениците в процеса на научно изследване. Разглеждат се възможностите на този тип обучение за развитие на когнитивни, практически и метакогнитивни компетентности, включително умения за анализ, критично мислене, решаване на проблеми и работа в екип. Особено внимание се отделя на интеграцията на съвременни дигитални технологии като виртуална реалност, 3D принтиране и изкуствен интелект, които разширяват границите на традиционния експеримент. Подчертава се ролята на тези технологии за повишаване на мотивацията и ангажираността на учениците. Резултатите от анализа показват, че интерактивният учебен експеримент създава условия за по-дълбоко разбиране на учебното съдържание, като същевременно подпомага изграждането на умения, необходими за успешна реализация в съвременната среда.

КЛЮЧОВИ ДУМИ: интерактивно обучение, експеримент, STEM образование, дигитални технологии, виртуална реалност, 3D принтиране, изкуствен интелект.

INTERACTIVE LEARNING EXPERIMENT IN CHEMISTRY AND PHYSICS EDUCATION: MODERN APPROACHES, DIGITAL TRANSFORMATION, AND EDUCATIONAL PERSPECTIVES

Evel Komarov, Damyana Grancharova

South-West University "Neofit Rilski", 66 Ivan Mihailov Str., Blagoevgrad, 2700, Bulgaria

ABSTRACT

This study examines the role of the interactive learning experiment in chemistry and physics education as an important part of modern STEM education. The focus is on its role as a teaching approach that changes the traditional way of teaching by actively involving students in scientific investigation. The paper explores how this type of learning helps develop cognitive, practical, and metacognitive skills, including analysis, critical thinking, problem solving, and teamwork. Special attention is given to the use of modern digital technologies such as virtual reality, 3D printing, and artificial intelligence, which expand the possibilities of traditional experiments. These technologies also increase student motivation and engagement. The results show that interactive learning experiments help students understand the learning content more deeply and support the development of skills needed for success in the modern world.

KEYWORDS: interactive learning, experiment, STEM education, digital technologies, virtual reality, 3D printing, artificial intelligence.

1. Увод

В условията на бързо развиващо се общество, характеризиращо се с интензивна дигитализация, ускорен научно-технологичен прогрес и нарастващи глобални предизвикателства, образователните системи са изправени пред необходимостта да трансформират своите традиционни подходи и методи на преподаване. Съвременното образование все по-ясно се ориентира към изграждане на ключови компетентности, които надхвърлят рамките на възпроизвеждането на знания и включват критично мислене, аналитични умения, креативност и способност за решаване на комплексни проблеми в реални ситуации (Zawacki-Richter et al., 2019). В този контекст обучението по природни науки, и по-специално по химия и физика, придобива стратегическо значение, тъй като именно тези дисциплини формират основата на научната грамотност и технологичната компетентност, необходими за успешно функциониране в съвременното общество (Bybee, 2018).

Традиционният модел на обучение, основан върху лекционно представяне и механично възпроизвеждане на информация, постепенно губи своята ефективност. Множество изследвания показват, че пасивните методи на преподаване водят до по-ниска ангажираност на учениците и ограничено разбиране на учебното съдържание (Freeman et al., 2014). В резултат на това учениците често срещат затруднения при прилагането на теоретичните знания в практиката и демонстрират ниска мотивация за учене. Тази тенденция налага необходимостта от преход към подходи, насочени

към ученика, които насърчават активното участие, изследователското мислене и самостоятелното откриване на знания.

В този контекст интерактивният учебен експеримент се утвърждава като един от най-ефективните педагогически инструменти за реализиране на съвременните образователни цели. Той предоставя възможност за активно включване на учениците в процеса на научно изследване, като съчетава теория и практика и създава условия за изграждане на дълбоко и устойчиво разбиране на природните явления. Чрез експерименталната дейност учениците не само наблюдават и възприемат информация, но участват в нейното конструиране чрез формулиране на хипотези, провеждане на експерименти и анализ на резултатите (Holmes et al., 2015).

Освен това интерактивният експеримент има доказан положителен ефект върху развитието на критичното мислене и научната аргументация. Според Thibaut et al. (2018) интегрирането на STEM подходи, включващи експериментална дейност, води до значително повишаване на способността на учениците да анализират данни, да правят обосновани изводи и да решават реални проблеми. Това е особено важно в контекста на съвременния пазар на труда, който изисква не само знания, но и умения за тяхното приложение в различни ситуации.

Допълнително, развитието на дигиталните технологии създава нови възможности за обогатяване на експерименталната дейност. Интеграцията на виртуална реалност, симулации и дигитални инструменти позволява визуализация на сложни процеси и явления, които трудно могат да бъдат наблюдавани в традиционна лабораторна среда (Makransky & Petersen, 2019). Това не само улеснява разбирането на абстрактни концепции, но и повишава мотивацията и ангажираността на учениците. Интерактивният учебен експеримент може да бъде разглеждан като ключов елемент на съвременното обучение по химия и физика, който съчетава педагогическа ефективност с иновативни технологии и създава условия за развитие на компетентности, необходими за успешно участие в научно-технологичното общество на XXI век.

2. Теоретична рамка на интерактивния учебен експеримент

Интерактивният учебен експеримент в обучението по химия и физика се основава на съвременни педагогически парадигми, които разглеждат ученето като активен, конструктивен и социално обусловен процес. Водещо място сред тези теории заема конструктивизмът, който поставя акцент върху ролята на обучаемия като активен участник в изграждането на знания. Според този подход знанието не се предава механично от учителя към ученика, а се конструира чрез взаимодействие с обкръжаващата среда, предходния опит и социалния контекст (Piaget, 1972; Vygotsky, 1978). В този смисъл учебният експеримент се превръща в ключов инструмент, който създава условия за активно

познавателно участие, позволявайки на учениците да изследват, да правят предположения и да достигат до собствени изводи.

Особено значима е и социално-конструктивистката перспектива, според която ученето се осъществява чрез сътрудничество и комуникация между участниците в образователния процес. В рамките на интерактивния експеримент учениците работят в екипи, обменят идеи и съвместно анализират резултатите, което подпомага развитието на комуникативни и социални умения. Тази съвместна среда допринася за по-дълбоко осмисляне на учебното съдържание и изграждане на устойчиви знания (Hmelo-Silver, 2004).

Допълнително значение има теорията за учене чрез опит, формулирана от Kolb (1984), която разглежда ученето като цикличен процес, включващ четири основни етапа: конкретно преживяване, рефлексия върху преживяното, абстрактна концептуализация и активно експериментиране. В контекста на обучението по химия и физика този модел намира пряко приложение чрез интерактивния експеримент, при който учениците не само наблюдават явления, но и участват активно в тяхното изследване. Те формулират хипотези, провеждат експерименти, анализират резултатите и ги свързват с теоретичните концепции, което води до по-дълбоко и трайно разбиране на учебния материал.

Съвременните педагогически изследвания подчертават и значението на изследователския подход (inquiry-based learning), който е тясно свързан с експерименталната дейност. Според този подход учениците се насърчават да задават въпроси, да търсят отговори чрез експерименти и да изграждат научни обяснения въз основа на събраните доказателства (National Research Council, 2012). Този модел на обучение е особено ефективен в природните науки, тъй като отразява реалния процес на научно познание.

Допълнително, интерактивният експеримент може да бъде разгледан и през призмата на когнитивните теории за учене, които акцентират върху ролята на активната обработка на информацията. При участие в експериментални дейности учениците ангажират различни когнитивни процеси – наблюдение, анализ, синтез и оценка – което подпомага изграждането на дълбоки и структурирани знания (Bransford at al., 2000).

В контекста на STEM образованието интерактивният експеримент се свързва и с инженерния дизайн процес, който включва идентифициране на проблем, генериране на идеи, разработване и тестване на решения. Този подход допълва традиционния научен метод и създава условия за интеграция на знания от различни дисциплини, като по този начин подпомага развитието на комплексни компетентности (Bybee, 2018).

Съвременни емпирични изследвания потвърждават ефективността на интерактивното обучение, базирано на експериментална дейност. Holmes et al. (2015) доказват, че учениците, които участват активно в лабораторни дейности, демонстрират значително по-високи нива на критично мислене и способност за анализ на данни в сравнение с тези, обучавани чрез традиционни методи. Подобни резултати са установени и от Freeman et al. (2014), които показват, че активното обучение в STEM дисциплините води до значително подобрение на академичните постижения и намаляване на неуспехите.

От своя страна Thibaut et al. (2018) подчертават, че интегрираният STEM подход, включващ експериментална дейност, допринася за развитието на умения за решаване на проблеми, креативност и интердисциплинарно мислене. Тези умения са ключови за успешната реализация на учениците в съвременната научно-технологична среда. Теоретичната рамка на интерактивния учебен експеримент се основава на съвкупност от съвременни педагогически теории и модели, които разглеждат ученето като активен, социален и контекстуален процес. Този подход не само подпомага усвояването на знания, но и създава условия за развитие на ключови компетентности, необходими за успешно участие в обществото на знанието.

3. Педагогическа същност

Интерактивният учебен експеримент представлява сложен и многоизмерен педагогически процес, който интегрира различни форми на познавателна активност и съчетава теоретичното знание с практическо приложение. В основата на този процес стои идеята за активно учене, при което учениците не са пасивни получатели на информация, а активни участници в изграждането на знания чрез изследване, наблюдение и анализ. Този подход е в съответствие със съвременните образователни парадигми, които поставят ученика в центъра на учебния процес и акцентират върху развитието на умения за самостоятелно учене и критично мислене (Prince, 2004).

Процесът на интерактивния експеримент обикновено започва с формулиране на проблем или изследователски въпрос, който има за цел да предизвика интереса на учениците и да създаде така наречения когнитивен конфликт. Според теорията на Piaget именно този конфликт между съществуващите знания и новата информация е двигател на познавателното развитие, тъй като стимулира учениците да търсят обяснения и да изграждат нови концептуални структури (Piaget, 1972). Формулирането на изследователски въпроси насърчава учениците да мислят в научни категории и да подхождат към учебния материал като към проблем, който изисква решение.

Следващият етап включва изграждане на хипотези, което представлява ключов момент в развитието на научното мислене. Учениците формулират предположения, базирани на предходни

знания и наблюдения, което активира процесите на анализ и логическо разсъждение. В този етап те започват да осъзнават връзката между теорията и практиката, като изграждат очаквания за резултатите от експеримента.

Експерименталната дейност, която следва, включва провеждане на наблюдения, извършване на измервания и събиране на данни. В рамките на интерактивния подход учениците не са ограничени до изпълнение на предварително зададени инструкции, а участват активно в планирането и реализирането на експеримента. Това предполага вземане на решения, избор на методи и интерпретация на резултатите, което значително разширява техните познавателни възможности. Според Bransford et al. (2000) именно активното участие в подобни дейности подпомага изграждането на дълбоко разбиране и способност за пренос на знания в нови ситуации.

Особено важен аспект на интерактивния експеримент е анализът на резултатите и извеждането на изводи. В този етап учениците сравняват получените данни със своите хипотези, оценяват тяхната достоверност и формулират научни обяснения. Този процес развива умения за критично мислене, аргументация и рефлексия, които са в основата на научната грамотност. Изследванията показват, че подобни дейности водят до значително подобрение в способността на учениците да анализират информация и да правят обосновани заключения (Holmes et al., 2015).

Ролята на учителя в този контекст претърпява съществена трансформация. Той вече не е основен източник на знания, а фасилитатор и организатор на учебния процес, който създава условия за активно учене и подпомага учениците в тяхното изследване. Това включва планиране на подходящи експериментални дейности, осигуряване на ресурси и подкрепа при възникване на затруднения. Освен това учителят трябва да стимулира рефлексията и да насърчава учениците да анализират собственото си учене, което е ключово за развитието на метакогнитивни умения (Schraw et al., 2006).

Не на последно място, интерактивният експеримент създава условия за развитие на социални и комуникативни умения, тъй като често се реализира в екипна форма. Учениците се учат да работят съвместно, да обменят идеи и да достигат до общи решения, което е от съществено значение за тяхната бъдеща професионална реализация в STEM области. Педагогическата същност на интерактивния учебен експеримент се характеризира с интеграция на когнитивни, практически и социални аспекти на обучението. Той представлява динамичен процес, който не само подпомага усвояването на знания, но и създава условия за развитие на ключови компетентности, необходими за успешно функциониране в съвременното общество.

4. Дигитални технологии и трансформация на интерактивния учебен експеримент

Дигиталните технологии играят все по-значима роля в съвременното образование, като трансформират не само начина на представяне на учебното съдържание, но и самата същност на учебния процес. В контекста на обучението по химия и физика те разширяват значително възможностите на интерактивния учебен експеримент, като създават нови условия за визуализация, симулация и анализ на сложни научни явления. Интеграцията на технологични решения позволява преодоляване на ограниченията на традиционната лабораторна среда, като същевременно повишава достъпността, безопасността и ефективността на експерименталната дейност (Radianti et al., 2020).

Едно от най-съществените направления в тази трансформация е използването на виртуални лаборатории и компютърни симулации. Те предоставят възможност за моделиране на процеси, които са трудно достъпни, скъпи или опасни за реално изпълнение. Чрез тях учениците могат да изследват химични реакции на молекулно ниво или да наблюдават физични явления като електромагнитни взаимодействия и квантови процеси. Виртуалните среди позволяват многократно повторение на експеримента, контрол върху параметрите и незабавна обратна връзка, което съществено подпомага процеса на учене и намалява когнитивното натоварване (de Jong et al., 2013). Освен това те създават условия за диференцирано обучение, при което учениците могат да работят със собствено темпо и да адаптират експерименталната дейност според своите индивидуални потребности.

Виртуалната реалност (VR) представлява следващото ниво в развитието на дигиталните технологии в образованието, като предоставя напълно потапяща среда за обучение. Чрез VR учениците могат да „влязат“ в микросвета на молекулите или да наблюдават физични процеси в триизмерно пространство, което значително улеснява разбирането на абстрактни и пространствено сложни концепции. Изследванията показват, че използването на VR води до по-добра визуализация, повишена мотивация и по-дълбоко концептуално разбиране, особено в областта на природните науки (Makransky & Petersen, 2019). Допълнително предимство е възможността за симулиране на ситуации, които не могат да бъдат възпроизведени в реална лаборатория, като например екстремни физични условия или реакции на атомно ниво.

Друг съществен компонент на дигиталната трансформация е 3D принтирането, което позволява материализиране на научни модели и превръщането на абстрактни понятия в осезаеми обекти. Чрез създаване на модели на атомни структури, молекули, кристални решетки или физични системи, учениците получават възможност да взаимодействат директно с учебното съдържание. Това не само подпомага визуализацията, но и стимулира инженерното мислене и креативността. Включването на учениците в процеса на проектиране и създаване на тези модели допълнително засилва тяхната

ангажираност и създава условия за интеграция на знания от различни области (Ford & Minshall, 2019).

Изкуственият интелект (AI) също намира все по-широко приложение в образователния процес, като допълва експерименталната дейност чрез автоматизиран анализ на данни и персонализирана обратна връзка. AI системите могат да обработват големи обеми от експериментални резултати, да откриват закономерности и да предоставят интерпретации, които подпомагат разбирането на учениците. Освен това те могат да адаптират учебното съдържание спрямо индивидуалните нужди на обучаемите, като по този начин подпомагат диференцираното обучение и повишават ефективността на учебния процес (Zawacki-Richter et al., 2019).

Важно е да се отбележи, че най-добри резултати се постигат при комбиниране на традиционния експеримент с дигитални технологии, а не при тяхното заместване. Реалната лабораторна дейност осигурява практически опит и развитие на мануални умения, докато дигиталните инструменти разширяват възможностите за анализ, визуализация и интерпретация. Тази синергия между реална и виртуална среда създава условия за по-пълноценно и ефективно обучение. Дигиталните технологии трансформират интерактивния учебен експеримент, като го правят по-достъпен, по-гъвкав и по-ефективен. Те не само подпомагат разбирането на научните концепции, но и създават условия за развитие на умения, които са от съществено значение за съвременния свят, включително дигитална грамотност, аналитично мислене и способност за работа с данни.

5. Образователни ефекти

Интерактивният учебен експеримент оказва съществено и многопластово въздействие върху развитието на учениците, като обхваща когнитивната, практическата и мотивационната сфера на обучението. Този подход създава условия за интегрирано изграждане на знания и умения, което е в съответствие със съвременните изисквания към STEM образованието.

На когнитивно ниво интерактивният експеримент подпомага формирането на дълбоко концептуално разбиране, като позволява на учениците да свързват теоретичните знания с реални явления и процеси. Чрез активното участие в експерименталната дейност те не просто възприемат информация, а я обработват, интерпретират и прилагат в нови ситуации. Това стимулира развитието на висши когнитивни процеси като анализ, синтез и оценка, които са в основата на научното мислене (Anderson & Krathwohl, 2001). Освен това експерименталната дейност създава условия за преодоляване на алтернативни представи и погрешни схващания, тъй като учениците имат възможност да проверяват своите хипотези чрез реални наблюдения и измервания. Изследванията

показват, че подобен тип активно учене води до по-трайно усвояване на знанията и по-висока способност за трансфер в нови контексти (Freeman et al., 2014).

На практическо ниво интерактивният експеримент играе ключова роля за изграждането на умения, свързани с реалната научна и инженерна практика. Учениците развиват компетентности за работа с лабораторна апаратура, извършване на точни измервания, обработка и интерпретация на данни, както и спазване на правила за безопасност. Тези умения са съществена част от научната грамотност и са пряко свързани с бъдещата професионална реализация в STEM области. Освен това практическата дейност подпомага развитието на организационни и технически умения, като планиране на експеримент, управление на времето и систематизиране на резултатите. Според Bybee (2018) именно този тип практически ориентирано обучение създава условия за изграждане на компетентности, които са от съществено значение за съвременната икономика, базирана на знанието.

Съществено значение има и развитието на метакогнитивни умения, които често остават скрити, но са ключови за ефективното учене. В процеса на експерименталната дейност учениците се учат да планират своите действия, да наблюдават и оценяват собственото си разбиране, както и да коригират своите стратегии при необходимост. Този процес на рефлексия подпомага развитието на саморегулирано учене и изграждане на умения за учене през целия живот (Schraw et al., 2006).

На мотивационно ниво интерактивният експеримент има силно положително въздействие върху отношението на учениците към ученето и науката. Практическата насоченост на дейностите и възможността за активно участие създават усещане за значимост и смисъл на учебния процес. Учениците започват да възприемат обучението не като задължение, а като възможност за откриване, изследване и създаване на нови знания. Това води до повишена вътрешна мотивация, която е ключов фактор за успешното учене (Ryan & Deci, 2000).

Допълнително, експерименталната дейност стимулира любопитството и интереса към природните науки, като създава емоционална ангажираност с учебното съдържание. Изследванията показват, че учениците, които участват в интерактивни и практически ориентирани дейности, демонстрират по-висока степен на ангажираност и по-добри академични резултати (Holmes et al., 2015).

Не на последно място, интерактивният експеримент подпомага развитието на социални и комуникативни умения, особено когато се реализира в групова форма. Работата в екип изисква обмен на идеи, аргументация и съвместно вземане на решения, което развива умения за сътрудничество и ефективна комуникация. Тези компетентности са от съществено значение както за образователния процес, така и за бъдещата професионална реализация на учениците.

Образователните ефекти от интерактивния учебен експеримент се проявяват на различни нива и взаимно се допълват. Той не само подпомага усвояването на знания, но и създава условия за развитие на ключови компетентности, включително критично мислене, практически умения, мотивация и социална ангажираност, което го прави незаменим елемент от съвременното обучение по химия и физика.

6. Заключение

Интерактивният учебен експеримент се утвърждава като ключов елемент на съвременното обучение по химия и физика, който надхвърля рамките на традиционния метод и се превръща в цялостна педагогическа философия, ориентирана към активно и смислено учене. Неговата същност се изразява в интеграцията на теоретично знание с практическа дейност, което позволява на учениците не само да възприемат информация, но и да я осмислят, прилагат и трансформират в нови знания. По този начин обучението се превръща в процес на изследване и откриване, който поставя ученика в центъра на образователния процес и създава условия за развитие на самостоятелност и отговорност към ученето.

Анализът на педагогическите, когнитивните и технологичните аспекти на интерактивния експеримент показва, че той допринася съществено за изграждането на ключови компетентности, необходими в съвременното общество. Сред тях се открояват критичното мислене, уменията за решаване на проблеми, способността за работа с данни и развитието на научна аргументация. Наред с това експерименталната дейност подпомага формирането на практически умения и стимулира вътрешната мотивация на учениците, като превръща учебния процес в ангажиращо и значимо преживяване.

Особено важно е да се подчертае ролята на дигиталните технологии, които разширяват значително възможностите на интерактивния експеримент. Интеграцията на виртуални лаборатории, симулации, виртуална реалност, 3D принтиране и изкуствен интелект създава нови образователни сценарии, които надграждат традиционната лабораторна практика. Тези технологии не само улесняват визуализацията на сложни научни явления, но и подпомагат анализа на данни, персонализацията на обучението и развитието на дигитална грамотност. В този смисъл те не заменят, а допълват и обогатяват експерименталната дейност, създавайки синергия между реална и виртуална учебна среда.

В контекста на STEM и STEAM образованието интерактивният учебен експеримент може да бъде разглеждан като основополагащ механизъм за интеграция на знания от различни дисциплини и за изграждане на интердисциплинарно мислене. Той създава условия за свързване на научните

концепции с реални проблеми и ситуации, което е от съществено значение за подготовката на учениците за бъдеща професионална реализация.

Въпреки значителните си предимства, ефективното прилагане на интерактивния експеримент изисква целенасочена подготовка на учителите, адекватна материална база и интегриране на иновативни методи в учебните програми. Това предполага необходимост от системна подкрепа на образователните институции и развитие на политики, насочени към модернизиране на обучението по природни науки.

В заключение, интерактивният учебен експеримент не може да бъде разглеждан само като инструмент или метод, а като стратегически подход за трансформация на образователния процес. Той има потенциала да отговори на предизвикателствата на съвременното общество, като създава условия за формиране на компетентни, мислещи и адаптивни личности. Именно в тази перспектива интерактивният експеримент се очертава като основа за изграждане на бъдещето на STEM образованието и като ключов фактор за повишаване на качеството на обучението по химия и физика.

Използвана литература:

Anderson, L. W., & Krathwohl, D. R. (Eds.). (2001). *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. Longman.

Bransford, J. D., Brown, A. L., & Cocking, R. R. (2000). *How people learn: Brain, mind, experience, and school*. National Academies Press.

Bybee, R. W. (2018). *STEM education: Now more than ever*. NSTA Press.

de Jong, T., Linn, M. C., & Zacharia, Z. C. (2013). Physical and virtual laboratories in science and engineering education. *Science, 340*(6130), 305–308. https://doi.org/10.1126/science.1230579

Ford, S., & Minshall, T. (2019). Where and how 3D printing is used in teaching and education. *Additive Manufacturing, 25*, 131–150.

Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., … Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 111*(23), 8410–8415. https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111

Hmelo-Silver, C. E. (2004). Problem-based learning: What and how do students learn? *Educational Psychology Review, 16*(3), 235–266. https://doi.org/10.1023/B:EDPR.0000034022.16470.f3

Holmes, N. G., Wieman, C. E., & Bonn, D. A. (2015). Teaching critical thinking. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 112*(36), 11199–11204. https://doi.org/10.1073/pnas.1505329112

Kolb, D. A. (1984). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. Prentice-Hall.

Makransky, G., & Petersen, G. B. (2019). Investigating the process of learning with desktop virtual reality: A structural equation modeling approach. *Computers & Education, 134*, 15–30. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.02.002

National Research Council. (2012). *A framework for K–12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. National Academies Press. https://doi.org/10.17226/13165

Piaget, J. (1972). *The psychology of the child*. Basic Books.

Prince, M. (2004). Does active learning work? A review of the research. *Journal of Engineering Education, 93*(3), 223–231. https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2004.tb00809.x

Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education, 147*, Article 103778. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778

Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions. *Contemporary Educational Psychology, 25*(1), 54–67. https://doi.org/10.1006/ceps.1999.1020

Schraw, G., Crippen, K. J., & Hartley, K. (2006). Promoting self-regulation in science education: Metacognition as part of a broader perspective on learning. *Research in Science Education, 36*, 111–139. https://doi.org/10.1007/s11165-005-3917-8

Thibaut, L., Ceuppens, S., De Loof, H., De Meester, J., Goovaerts, L., Struyf, A., Boeve-de Pauw, J., Dehaene, W., Deprez, J., De Cock, M., Hellinckx, L., Knipprath, H., Langie, G., Struyven, K., Van de Velde, D., Van Petegem, P., & Depaepe, F. (2018). Integrated STEM Education: A Systematic Review of Instructional Practices in Secondary Education. *European Journal of STEM Education, 3*(1), Article 02. https://doi.org/10.20897/ejsteme/85525

Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press.

Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education—Where are the educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education, 16*, Article 39. https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0

ВИРТУАЛНИ И ИНТЕРАКТИВНИ СРЕДИ В ОБУЧЕНИЕТО ПО ПРИРОДНИ НАУКИ

Петя Стефанова, Дамяна Грънчарова

Югозападен университет "Неофит Рилски", ул. „Иван Михайлов“ 66, Благоевград, 2700, България

РЕЗЮМЕ

Настоящата статия анализира ролята на виртуалните и интерактивни среди като важен фактор за развитието на обучението по природни науки в контекста на съвременното STEM образование. Разглеждат се педагогическите възможности на технологии като виртуална реалност (VR), добавена реалност (AR), виртуални лаборатории и интерактивни симулации, които създават условия за по-активно и ангажиращо учене. Особено внимание се отделя на тяхното влияние върху мотивацията на учениците, учебните резултати и развитието на научното мислене. Подчертава се ролята на визуализацията и практическото взаимодействие за по-доброто разбиране на сложни и абстрактни научни концепции. Представен е и практически пример чрез STEM център в Югозападния университет „Неофит Рилски“, който демонстрира възможностите за ефективно прилагане на виртуални и интерактивни технологии в реална образователна среда..

КЛЮЧОВИ ДУМИ: виртуална реалност, интерактивни среди, STEM образование, виртуални лаборатории, природни науки.

VIRTUAL AND INTERACTIVE ENVIRONMENTS IN SCIENCE EDUCATION

Petya Stefanova, Damyana Grancharova

South-West University "Neofit Rilski", 66 Ivan Mihailov Str., Blagoevgrad, 2700, Bulgaria

ABSTRACT

This paper analyzes the role of virtual and interactive environments as an important factor in the development of science education in the context of modern STEM education. It explores the educational potential of technologies such as virtual reality (VR), augmented reality (AR), virtual laboratories, and interactive simulations, which create conditions for more active and engaging learning. Special attention is

given to their impact on student motivation, learning outcomes, and the development of scientific thinking. The paper highlights the importance of visualization and hands-on interaction for better understanding of complex and abstract scientific concepts. A practical example is also presented through a STEM center at South-West University "Neofit Rilski", which demonstrates the effective use of virtual and interactive technologies in a real educational environment.

KEYWORDS: virtual reality, interactive environments, STEM education, virtual laboratories, science education.

1. Въведение

Развитието на дигиталните технологии през последните десетилетия доведе до съществена трансформация в образователните системи по света, като промени не само средствата за преподаване, но и цялостната педагогическа парадигма. В обучението по природни науки тази трансформация е особено значима, тъй като дисциплините като химия, физика и биология изискват не само усвояване на теоретични знания, но и активно участие в експериментална дейност, визуализация на процеси и разбиране на сложни, често абстрактни явления.

Традиционните методи на обучение, базирани предимно на обяснение и демонстрация, невинаги осигуряват необходимата степен на ангажираност и дълбочина на разбиране. Това налага въвеждането на иновативни педагогически подходи, основани на принципите на конструктивизма, при които обучаемите изграждат знанията си чрез активно взаимодействие със средата и чрез собствен опит (Jiang et al., 2025). В този контекст виртуалните и интерактивни среди се утвърждават като ефективен инструмент за модернизация на обучението, тъй като създават условия за изследователско учене и учене чрез опит.

Тези среди позволяват създаването на динамични, визуално наситени и интерактивни учебни ситуации, в които обучаемите могат да наблюдават, моделират и анализират различни научни процеси. Чрез използването на виртуални лаборатории, симулации и триизмерни визуализации се подпомага разбирането на абстрактни концепции и се намалява когнитивното натоварване, свързано с обработката на сложна информация. Освен това, интерактивният характер на тези технологии стимулира активното участие, развива критичното мислене и насърчава самостоятелното изследване, което е ключово за формирането на научна грамотност и умения за решаване на проблеми (Radianti et al., 2020).

2. Теоретична рамка и същност на виртуалните среди

Виртуалните среди представляват компютърно генерирани образователни пространства, които позволяват на обучаемите да взаимодействат с обекти, процеси и явления в реално време. Те могат да бъдат напълно потапящи, каквато е виртуалната реалност (VR), при която потребителят се пренася в изцяло дигитална среда, или частично интегрирани с реалната среда, какъвто е случаят с добавената реалност (AR), при която виртуални елементи се наслагват върху реалния свят. Тези технологии създават нов тип образователна среда, която съчетава визуализация, интерактивност и възможности за симулация на сложни процеси.

От теоретична гледна точка, използването на виртуални среди в обучението може да бъде обяснено чрез конструктивистките и социално-конструктивистките теории за ученето, според които знанието не се предава директно от преподавателя към обучаемия, а се изгражда активно чрез взаимодействие със средата и чрез личен опит (Piaget, 1972; Vygotsky, 1978). В този контекст виртуалните среди предоставят възможност за създаване на автентични учебни ситуации, в които учениците могат да изследват, експериментират и откриват закономерности самостоятелно или в сътрудничество с други обучаеми.

Допълнително, теорията за когнитивното натоварване (Sweller, 2011) подчертава значението на ефективното представяне на информацията с цел оптимизиране на процеса на учене. Виртуалните и интерактивни среди подпомагат този процес чрез визуализация и структуриране на сложна информация, което намалява излишното когнитивно натоварване и улеснява разбирането на абстрактни научни концепции. Например, чрез триизмерни модели и симулации обучаемите могат да наблюдават молекулни структури, атомни взаимодействия или физични процеси, които са невидими в реална среда.

Изследвания в областта на образователните технологии показват, че използването на VR и AR води до значително повишаване на ангажираността и мотивацията на учениците, както и до подобряване на учебните резултати (Radianti et al., 2020). Това се дължи на високата степен на потапяне (immersion) и усещането за присъствие (presence), които създават условия за по-дълбоко когнитивно и емоционално включване в учебния процес.

Освен това, интерактивните среди създават предпоставки за активно учене, базирано на изследване (inquiry-based learning) и експериментиране, което е в съответствие със съвременните педагогически модели в STEM образованието. Чрез възможността за многократно тестване на хипотези, анализ на резултати и получаване на незабавна обратна връзка, обучаемите развиват умения за критично мислене, решаване на проблеми и научно-изследователска дейност.

3. Виртуални лаборатории и симулации

Виртуалните лаборатории представляват едно от най-значимите и перспективни приложения на интерактивните среди в STEM образованието, като предоставят възможност за провеждане на експерименти в дигитална среда, която симулира реални научни условия. Чрез използването на специализиран софтуер и симулационни платформи обучаемите могат да извършват експерименти, които в реална лаборатория биха били свързани с високи разходи, риск за безопасността или необходимост от специфична апаратура и условия. Това е особено важно в обучението по химия и физика, където работата с опасни вещества или сложни уреди изисква строг контрол и предварителна подготовка.

От педагогическа гледна точка, виртуалните лаборатории се вписват в рамката на изследователския подход в обучението (inquiry-based learning), при който учениците формулират хипотези, провеждат експерименти, анализират резултати и правят изводи. Този подход насърчава активното участие и изграждането на знания чрез собствен опит, което е в съответствие с конструктивистките теории за ученето. Виртуалната среда предоставя възможност за контролиране на параметрите на експеримента и за наблюдение на причинно-следствени връзки, което подпомага по-доброто разбиране на научните явления.

Проучванията показват, че виртуалните лаборатории не само подпомагат постигането на учебните цели, но и разширяват достъпа до качествено образование, като предоставят равни възможности за всички обучаеми, включително за тези със специални образователни потребности или ограничен достъп до физическа лабораторна база (Brinson, 2015). Освен това, възможността за многократно повторение на експериментите без допълнителни разходи позволява задълбочено усвояване на научни знания и умения, както и развитие на увереност при работа с научни методи (de Jong et al., 2013).

Съществено предимство на виртуалните лаборатории е и възможността за незабавна обратна връзка, която подпомага процеса на учене чрез корекция на грешки в реално време. Това създава условия за саморегулирано учене, при което обучаемите могат да проследяват собственото си развитие и да подобряват резултатите си. Изследвания показват, че интерактивната обратна връзка в дигитална среда води до по-добро усвояване на знанията и по-висока ангажираност (Radianti et al., 2020).

Друг важен аспект е интегрирането на игрови елементи (gamification), като нива, мисии, награди и предизвикателства, които допълнително повишават мотивацията и ангажираността на учениците. Тези елементи създават усещане за постижение и напредък, което стимулира продължително

участие в учебния процес. В комбинация с визуализацията и интерактивността, геймификацията превръща обучението в по-привлекателно и ефективно преживяване (Deterding et al., 2011).

В допълнение, виртуалните лаборатории предоставят възможности за интегриране на междупредметни връзки, като комбинират знания от различни научни области и подпомагат развитието на ключови компетентности като критично мислене, анализ на данни и решаване на проблеми. По този начин те се превръщат в важен инструмент за реализиране на съвременните цели на STEM образованието и за подготовка на учениците за реални научни и професионални предизвикателства.

4. Влияние върху учебните резултати и мотивацията

Множество изследвания в областта на образователните технологии доказват положителното въздействие на виртуалните и интерактивни среди върху учебните резултати на учениците. Тези среди създават условия за по-активно участие в учебния процес, което от своя страна води до по-добро разбиране и по-дълготрайно усвояване на знанията. Систематични прегледи и мета-анализи показват, че използването на технологии като виртуална реалност (VR) и добавена реалност (AR) има значим положителен ефект върху различни аспекти на ученето. На първо място, се наблюдава подобряване на академичните постижения, което се обяснява с възможността за визуализация и интерактивно представяне на сложни научни концепции. Освен това, VR и AR технологиите водят до съществено повишаване на мотивацията и ангажираността на учениците, като създават усещане за присъствие и потапяне в учебната среда. Това усещане за „преживяване“ на учебното съдържание прави процеса на учене по-интересен и значим за обучаемите (Radianti et al., 2020). Друг важен резултат е развитието на когнитивни и метакогнитивни умения, включително умения за анализ, синтез, саморефлексия и саморегулация на ученето. Интерактивният характер на виртуалните среди насърчава учениците да експериментират, да правят предположения и да оценяват резултатите от собствените си действия, което е ключово за формирането на научно мислене (Jiang et al., 2025).

Допълнително, изследванията показват, че използването на VR в STEM образованието води до повишаване на самоефективността и увереността на учениците в собствените им способности. Това е свързано с възможността за безопасно упражняване и повторение на дейности, както и с получаването на незабавна обратна връзка (Koc & Yildirim, 2025). Съдържателните анализи на научната литература в тази област показват, че най-често изследваните ефекти от използването на виртуална реалност са именно свързани с мотивацията, учебните постижения и увереността в собствените способности на обучаемите. Това подчертава значението на тези технологии като средство не само за предаване на знания, но и за изграждане на положително отношение към ученето

и повишаване на увереността в собствените възможности. Натрупаните научни доказателства ясно показват, че виртуалните и интерактивни среди не само улесняват процеса на учене чрез по-добра визуализация и достъпност на информацията, но и го правят по-ефективен, ангажиращ и ориентиран към развитие на ключови компетентности, необходими за съвременното общество.

5. Интеграция в STEM обучението

Виртуалните технологии играят ключова роля в реализирането на интегрирани STEM подходи, като създават условия за ефективно съчетаване на знания и умения от различни научни области. В рамките на този интердисциплинарен подход обучаемите не разглеждат отделните дисциплини изолирано, а ги прилагат в контекста на реални проблеми, които изискват комплексно мислене и интегрирани решения. Виртуалните и интерактивни среди подпомагат този процес, като предоставят гъвкава и богата на ресурси среда за експериментиране, моделиране и анализ (Bybee, 2013).

Чрез използването на съвременни дигитални инструменти учениците могат активно да участват в учебния процес, като прилагат теоретични знания в практически ситуации. Например, те могат да:

- моделират молекулни структури и химични взаимодействия чрез 3D софтуер, което подпомага пространственото мислене и разбирането на микросвета;
- симулират инженерни решения и технологични процеси, като изследват различни варианти и оценяват ефективността им;
- анализират данни в интерактивна среда, използвайки визуализации и дигитални инструменти за обработка на информация;
- провеждат виртуални експерименти, при които могат да променят параметри, да наблюдават резултати и да правят изводи в безопасна и контролирана среда.

Тези дейности насърчават активното учене и ангажират обучаемите в процеси, близки до реалната научна и инженерна практика. Освен това, те създават възможности за прилагане на проектно-базирано обучение (project-based learning), при което учениците работят по дългосрочни задачи, изискващи планиране, сътрудничество и интеграция на знания от различни области (Krajcik & Blumenfeld, 2006).

От педагогическа гледна точка този подход подпомага развитието на ключови умения за 21-ви век, като критично мислене, креативност, умения за решаване на проблеми и работа в екип. Интерактивният характер на виртуалните среди стимулира комуникацията и сътрудничеството между учениците, като ги поставя в активна роля на изследователи и създатели на знания. Използването на виртуални технологии в STEM обучението подпомага изграждането на връзка между учебното съдържание и реалния свят, като прави ученето по-смислено и приложимо. По този

начин се създават условия за формиране на устойчив интерес към науката и технологиите, както и за подготовка на обучаемите за бъдещи професионални предизвикателства.

6. Case Study: STEM център при Югозападен университет „Неофит Рилски“

Практическо приложение на виртуалните и интерактивни среди може да бъде наблюдавано в STEM център към Югозападен университет „Неофит Рилски“, който представлява съвременна образователна среда, създадена с цел внедряване на иновативни подходи в обучението по природни науки. Центърът е изграден като пространство, в което се съчетават традиционни лабораторни дейности с модерни дигитални технологии, предоставяйки условия за интегрирано и практико-ориентирано обучение.

В рамките на центъра са внедрени разнообразни технологични решения, които подпомагат реализирането на интерактивни и изследователски модели на обучение. Сред тях се включват VR очила за потапящо обучение, които позволяват на обучаемите да се „потопят“ в триизмерни среди и да изследват обекти и процеси, невидими в реалността. Използването на 3D принтери създава възможност за материализиране на абстрактни научни модели, като молекулни структури, анатомични обекти или инженерни прототипи, което подпомага разбирането чрез визуализация и практическа дейност.

Допълнително, центърът разполага с интерактивни дисплеи и специализирани симулационни платформи, които позволяват динамично представяне на учебното съдържание и активно участие на обучаемите в учебния процес. Специализираните лаборатории по природни науки са оборудвани така, че да осигуряват както реални експерименти, така и възможност за тяхното допълване чрез виртуални симулации, което създава балансирана и ефективна учебна среда. Обученията, провеждани в STEM центъра, са структурирани така, че да комбинират теоретична подготовка с практическа работа в дигитална и експериментална среда. В рамките на тези обучения участниците - както учители, така и ученици - имат възможност да работят с виртуални лаборатории, да симулират химични реакции, да изследват физични процеси и да визуализират сложни научни явления чрез VR технологии. Този подход създава условия за активно учене, при което обучаемите не са пасивни слушатели, а участници в процеса на научно изследване.

Особено важно е, че центърът се използва и за обучение на учители, което допринася за разширяване на техните дигитални и педагогически компетентности и за последващо прилагане на иновативни методи в училищната практика. По този начин се осигурява устойчивост на въведените технологии и тяхното разпространение в по-широк образователен контекст.

Първоначалните резултати от дейността на STEM центъра показват повишен интерес към природните науки, по-висока степен на ангажираност и активно участие от страна на обучаемите, както и подобряване на практически и изследователски умения. Наблюдава се и положително отношение към използването на дигитални технологии в обучението, както от страна на учениците, така и от страна на учителите. Той се утвърждава като успешен модел за интегриране на виртуални и интерактивни технологии в образованието, демонстрирайки как съвременната дигитална среда може да бъде ефективно използвана за подобряване на качеството на обучението по природни науки и за подготовка на обучаемите за предизвикателствата на съвременния свят.

7. Предизвикателства при внедряването

Въпреки значителния потенциал на виртуалните и интерактивни среди за подобряване на обучението, тяхното внедряване и ефективно използване е свързано с редица предизвикателства, които следва да бъдат внимателно анализирани и преодолявани.

На първо място, съществено ограничение представлява необходимостта от изграждане на подходяща техническа инфраструктура. Въвеждането на технологии като виртуална реалност, интерактивни платформи и специализиран софтуер изисква значителни финансови инвестиции, както за закупуване на оборудване, така и за неговата поддръжка и обновяване. Освен това, необходимостта от стабилна интернет свързаност и съвместимост между различните системи често се оказва допълнително предизвикателство, особено в образователни институции с ограничени ресурси.

На второ място, ключов фактор за успешното прилагане на тези технологии е подготовката на учителите. Ефективното използване на виртуални среди изисква не само базови дигитални умения, но и развиване на специфични педагогически компетентности, свързани с интегрирането на технологиите в учебния процес. Учителите трябва да могат да подбират подходящи дигитални инструменти, да ги адаптират към учебното съдържание и да създават интерактивни учебни сценарии, които да подпомагат постигането на образователните цели.

Допълнително, изследванията посочват и редица потенциални затруднения, свързани с използването на виртуални технологии, като разсейване на вниманието, повишено когнитивно натоварване и технически проблеми по време на работа. В някои случаи прекомерната визуална и информационна наситеност на дигиталната среда може да затрудни възприемането на учебното съдържание и да намали ефективността на обучението. Също така, техническите неизправности или липсата на достатъчна подготовка за работа с конкретни платформи могат да доведат до прекъсване на учебния процес и загуба на време.

Не на последно място, съществува необходимост от намиране на балансиран подход между традиционните и дигиталните методи на обучение. Въпреки че виртуалните среди предлагат значителни предимства, те не могат напълно да заместят реалната експериментална дейност и директното взаимодействие с физическата среда. Поради това е важно те да се използват като допълващ, а не като заместващ инструмент, който обогатява учебния процес и създава условия за по-пълноценно усвояване на знанията. Успешното внедряване на виртуални и интерактивни среди в образованието изисква цялостен и стратегически подход, включващ инвестиции в инфраструктура, целенасочена подготовка на учителите и внимателно педагогическо планиране, което да гарантира ефективното им използване в учебния процес.

8. Бъдещи перспективи

Развитието на технологии като изкуствен интелект, разширена и виртуална реалност, както и адаптивни обучителни системи, значително ще разшири възможностите на виртуалните среди в образованието. Тези технологии създават предпоставки за изграждане на по-интелигентни и гъвкави образователни решения, които могат да отговарят на динамичните изисквания на съвременното общество и на индивидуалните потребности на обучаемите.

Особено важна тенденция е развитието на персонализирани учебни среди, базирани на алгоритми на изкуствения интелект, които анализират поведението, напредъка и стиловете на учене на учениците. Въз основа на тези данни системите могат да адаптират съдържанието, темпото и трудността на задачите, като по този начин подпомагат по-ефективното усвояване на знанията и развитието на индивидуалния потенциал на всеки обучаем. Това води до преминаване от традиционния унифициран модел на обучение към по-гъвкав и ориентиран към ученика подход. Виртуалните среди предоставят нови възможности за глобално сътрудничество и обмен на знания. Чрез онлайн платформи, виртуални класни стаи и споделени дигитални ресурси ученици и учители от различни държави могат да работят съвместно по проекти, да обменят идеи и да участват в международни образователни инициативи. Това не само разширява достъпа до качествено образование, но и развива междукултурна комуникация и умения за работа в глобална среда. В този контекст ролята на учителя претърпява съществена трансформация. От традиционен източник на знания той постепенно се превръща във фасилитатор и ментор, който насочва, подкрепя и организира учебния процес. Учителят подпомага учениците при ориентирането в информационната среда, стимулира критичното мислене и съдейства за развитието на умения за самостоятелно учене и изследване. Бъдещето на виртуалните среди в образованието е свързано с все по-тясна интеграция

на интелигентни технологии, които не само обогатяват учебния процес, но и променят неговата философия - от предаване на знания към активно, персонализирано и съвместно учене

9. Заключение

Виртуалните и интерактивни среди представляват мощен инструмент за трансформация на обучението по природни науки, като съществено променят начина, по който се създава, представя и усвоява учебното съдържание. Те създават условия за активно, ангажиращо и ефективно учене, при което обучаемите не са пасивни получатели на информация, а активни участници в процеса на познание. Чрез възможностите за визуализация, симулация и интерактивно взаимодействие тези технологии подпомагат разбирането на сложни научни концепции и насърчават развитието на умения за анализ, критично мислене и решаване на проблеми. Виртуалните среди отговарят на изискванията на съвременното общество, което се характеризира с бързо развитие на технологиите и необходимост от дигитална грамотност и адаптивност. Те създават възможности за персонализирано обучение, сътрудничество и прилагане на знанията в практически контекст, което е от ключово значение за подготовката на учениците за реални професионални и житейски ситуации.

Практическият пример със STEM център към Югозападен университет „Неофит Рилски“ показва, че интеграцията на виртуални и интерактивни технологии в образователната практика е напълно осъществима и води до значими положителни резултати. Реализирането на обучения в среда, съчетаваща дигитални инструменти и реална експериментална дейност, демонстрира повишена ангажираност на обучаемите, по-добро разбиране на учебното съдържание и развитие на практически и изследователски умения.

В обобщение, внедряването на виртуални и интерактивни среди не следва да се разглежда като временна тенденция, а като устойчива посока за развитие на съвременното образование. Тяхното ефективно използване изисква целенасочени усилия, стратегическо планиране и подготовка на педагогическите кадри, но същевременно предоставя значителни възможности за повишаване на качеството на обучението по природни науки и за формиране на компетентности, необходими в условията на динамично развиващия се свят.

Използвана литература:

Brinson, J. R. (2015). Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research. *Computers & Education, 87*, 218–237. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.07.003

Bybee, R. W. (2013). *The case for STEM education: Challenges and opportunities*. NSTA Press.

de Jong, T., Linn, M. C., & Zacharia, Z. C. (2013). Physical and virtual laboratories in science and engineering education. *Science, 340*(6130), 305–308. https://doi.org/10.1126/science.1230579

Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., & Nacke, L. (2011). From game design elements to gamefulness: Defining "gamification". In *Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference* (pp. 9–15). https://doi.org/10.1145/2181037.2181040

Jiang, H., Zhu, D., Chugh, R. *et al.* (2025). Virtual reality and augmented reality-supported K-12 STEM learning: trends, advantages and challenges. *Education and Information Technologies, 30*, 12827–12863. https://doi.org/10.1007/s10639-024-13210-z

Koc, A., & Yildirim, P. (2025). Research trends in the use of virtual reality in STEM education: A content analysis. *International Journal on Studies in Education, 7*(4), 835–866. https://doi.org/10.46328/ijonse.1940

Krajcik, J. S., & Blumenfeld, P. C. (2006). Project-based learning. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (pp. 317–334). Cambridge University Press.

Piaget, J. (1972). *The psychology of the child*. Basic Books.

Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education, 147*, 103778. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778

Sweller, J. (2011). Cognitive load theory. In J. P. Mestre & B. H. Ross (Eds.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 55, pp. 37–76). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387691-1.00002-8

Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press.

GAMIFICATION IN CHEMISTRY EDUCATION: TEACHERS' PERCEPTIONS OF ITS IMPACT ON MOTIVATION AND LEARNING

Borislava Pavlova, Aleksandra Tencheva

Department of Chemistry, South-West University "Neofit Rilski", Blagoevgrad, Bulgaria

ABSTRACT

The contemporary educational system is characterized by rapid technological development, dynamic changes in curricula, and increasing demands for the development of sustainable STEM competencies. These challenges raise questions about the effectiveness of traditional teaching methods, which often face difficulties in maintaining high levels of student engagement, intrinsic motivation, and active participation, particularly in subjects such as chemistry that require both the understanding of abstract theoretical concepts and the development of practical skills. In response to these challenges, there is growing interest in innovative pedagogical strategies that integrate interactivity, active participation, and experiential learning into the educational process. Among these approaches, gamification has emerged as an effective and promising educational strategy. It is based on the structured integration of game elements—such as points, levels, badges, missions, and systematic feedback—into traditional educational practices without transforming the learning process itself into a game. The theoretical framework of the study is based on Self-Determination Theory, which considers autonomy, competence, and relatedness as key factors in the development of intrinsic motivation. In this context, gamification may contribute to the creation of a more engaging and supportive educational environment. The present study aims to explore chemistry teachers' attitudes toward the use of gamification in chemistry education. The focus is placed on teachers' perceptions regarding the impact of game-based elements on student motivation, engagement, and understanding of the learning material. Data were collected through an online questionnaire administered to 30 chemistry teachers working in lower and upper secondary education. The findings reveal generally positive attitudes toward gamification, with most participants reporting that game-based elements enhance student motivation, engagement, and understanding of chemistry concepts. Teachers identified practice and reinforcement activities as the most appropriate contexts for implementing gamification, while lack of time and insufficient resources were reported as the main barriers to its use. The results suggest that gamification has considerable potential as an innovative instructional strategy for creating more engaging, interactive, and student-centered chemistry learning environments.

KEYWORDS: gamification, chemistry education, motivation, teachers' attitudes, STEM education, engagement, active learning

1. Introduction

Chemistry education presents specific challenges associated with the understanding of abstract theoretical concepts, symbolic representations, and processes that cannot be directly observed. These characteristics often contribute to learning difficulties, reduced student interest, and lower levels of motivation. As a result, there is an increasing need for innovative pedagogical approaches capable of creating more engaging, interactive, and supportive learning environments (Sharma et al., 2024).

One of these approaches is gamification, which refers to the integration of game elements into the educational process with the aim of increasing students' motivation and engagement. Through the use of elements such as points, levels, badges, missions, and feedback, gamification creates opportunities for active participation and experiential learning without transforming the educational process entirely into a game (Christopoulos & Mystakidis, 2023).

The theoretical foundation of such approaches can be explained through Self-Determination Theory, which emphasizes the role of autonomy, competence, and relatedness as key factors in the development of intrinsic motivation. In this sense, gamification (Li et al., 2024) has the potential to support these aspects of the learning process by creating conditions for greater engagement and satisfaction with learning.

Despite the growing interest in the implementation of gamification in education, it is necessary to investigate teachers' attitudes toward its use, particularly in the context of chemistry education. Understanding these attitudes is essential for the effective implementation of gamified approaches in educational practice (Jiménez-Valverde et al., 2024).

Research on gamification in chemistry education has increased internationally in recent years. Previous studies have reported positive effects of gamified approaches on students' motivation, engagement, and learning outcomes in science education (Jiménez-Valverde et al., 2024; Li et al., 2024). Research has also shown that teachers generally recognize the educational potential of gamification, although challenges related to time, resources, and implementation remain evident (Gaurina & Pavlin, 2025). However, studies focusing specifically on chemistry teachers' attitudes toward the use of gamification remain relatively limited, particularly within the Bulgarian educational context. Although research on STEM education and innovative teaching approaches has expanded in Bulgaria in recent years, empirical evidence regarding chemistry teachers' perceptions of gamification is still scarce (Paunova-Hubenova et al., 2025).

The present study aims to explore chemistry teachers' attitudes toward the use of gamification in chemistry education. The focus is placed on their perceptions regarding motivation, engagement, and the effectiveness of game-based elements in the learning process.

2. Theoretical Background

2.1. Gamification as an Educational Approach

Gamification has emerged as an innovative pedagogical approach that integrates game elements into non-game contexts, such as education, in order to enhance learners' motivation and engagement. Unlike traditional educational games, gamification does not require the transformation of the entire learning process into a game. Instead, it involves the strategic use of specific game mechanics—such as points, levels, badges, challenges, and feedback systems—within existing instructional frameworks (Moseikina et al., 2022).

The primary goal of gamification is to make the learning process more interactive and engaging. By incorporating elements commonly associated with games, educators can create a learning environment that stimulates curiosity, competition, achievement, and active participation. These elements contribute to increased student involvement and can foster more positive attitudes toward learning (Llorens-Largo et al., 2016); (Bhardwaj et al., 2025).

One of the key advantages of gamification is its ability to support active learning. Instead of passively receiving information, students are encouraged to participate in tasks, solve problems, and engage in collaborative activities. This aligns with contemporary educational approaches that emphasize student-centered learning and experiential engagement (Bhardwaj et al., 2025). In addition, gamification provides continuous feedback, which is essential for effective learning. Immediate responses to student actions allow learners to better understand their progress and identify areas for improvement. This ongoing feedback process supports self-regulation and helps maintain motivation over time.

Another important characteristic of gamification is its adaptability. Game elements can be adjusted to different subjects, age groups, and educational objectives, making this approach flexible and applicable in a variety of educational contexts. As a result, gamification has gained increasing attention as a tool for improving teaching practices and learning outcomes.

2.2. Gamification in Chemistry Education

The application of gamification in chemistry education has attracted growing interest due to the specific challenges associated with teaching and learning chemistry. The subject often involves abstract concepts, symbolic representations, and microscopic processes that are difficult for students to visualize and understand. Consequently, traditional teaching methods may not always be sufficient to maintain students' interest and motivation.

In this context, gamification offers a promising approach for enhancing chemistry instruction. By integrating game-based elements into the learning process, teachers can create a more interactive and motivating educational environment. Activities such as quizzes, laboratory missions, educational

competitions, and problem-solving challenges can encourage students to participate actively and develop a deeper understanding of chemistry concepts (Aliyu, 2025).

Gamified learning environments can also contribute to the development of important cognitive and practical skills. Students are encouraged to think critically, solve problems, collaborate with peers, and apply theoretical knowledge in practical situations. These skills are essential not only for chemistry education but also for the development of broader STEM competencies.

Furthermore, gamification can increase students' motivation and engagement by making learning activities more enjoyable and meaningful. When students perceive learning as interesting and rewarding, they are more likely to invest effort, participate actively, and persist in overcoming academic difficulties.

Despite these advantages, the successful implementation of gamification in chemistry education depends on several factors, including teachers' readiness, access to appropriate resources, and the alignment of game elements with educational objectives. Therefore, investigating teachers' perceptions of gamification is important for understanding its potential and limitations in educational practice.

2.2. Motivation and Student Engagement

Student motivation and engagement are widely recognized as essential factors for effective learning, particularly in subjects perceived as difficult, such as chemistry. Motivation can be understood as the internal drive that influences students' willingness to participate in learning activities, while engagement refers to the level of attention, interest, and active involvement in the educational process.

A useful framework for understanding motivation is Self-Determination Theory, which distinguishes between intrinsic and extrinsic motivation. According to this theory, intrinsic motivation develops when three basic psychological needs are satisfied: autonomy, competence, and relatedness. Students are more likely to be motivated when they feel capable, experience a sense of control over their learning, and participate in meaningful social interaction.

Gamification has the potential to support these motivational factors. Game elements such as progression, rewards, challenges, and immediate feedback can enhance students' sense of competence and autonomy, while collaborative activities can strengthen communication and social connectedness. As a result, gamified learning environments may contribute to higher levels of engagement and sustained interest in chemistry education.

Student engagement, in turn, plays a significant role in academic achievement. Engaged students are more likely to participate actively, invest effort in learning tasks, and persist when facing challenges. In chemistry education, increasing engagement is particularly important because it can help students overcome difficulties related to abstract concepts and complex problem-solving activities (Benjamin, 2024).

For this reason, understanding teachers' perspectives on the use of gamification is essential for the development of more engaging, motivating, and effective instructional practices in chemistry education.

3. Methodology

The present study was designed as a pilot survey aimed at exploring chemistry teachers' attitudes toward the use of gamification in chemistry education.

3.1. Participants

The participants in the study were 30 chemistry teachers teaching in lower and upper secondary education. The sample included teachers with different levels of professional experience and teaching practice in order to obtain a broader perspective on the implementation of gamification in chemistry education.

3.2. Instrument

Data were collected through a structured questionnaire consisting of closed-ended questions. The questionnaire was developed specifically for the purposes of the present study and included multiple-choice and Likert-scale items designed to examine teachers' perceptions regarding the effectiveness of gamification, its influence on student motivation and engagement, and the challenges associated with its implementation in chemistry education. Data collection was conducted during April 2026. The questions focused on key aspects such as:

- frequency of gamification use;
- perceived impact on student motivation;
- effectiveness for understanding learning content;
- preferred areas for applying gamification;
- difficulties encountered during implementation.

3.3. Procedure

The questionnaire was administered online using a digital platform. Participation in the study was voluntary and anonymous. The respondents were informed about the purpose of the research and were encouraged to provide honest answers based on their professional experience and teaching practice.

3.4. Data Analysis

The collected data were analyzed using descriptive statistical methods, including frequencies and percentages. The results were presented through charts and graphical representations in order to identify general trends in chemistry teachers' attitudes toward the use of gamification in education. The main findings are presented in Figures 1–7.

4. Results

The results of the conducted survey reveal generally positive attitudes among chemistry teachers toward the implementation of gamification in chemistry education. The collected data provide information regarding teachers' professional experience, the educational levels in which they teach, the frequency of gamification use, and their perceptions of its effectiveness, benefits, and challenges.

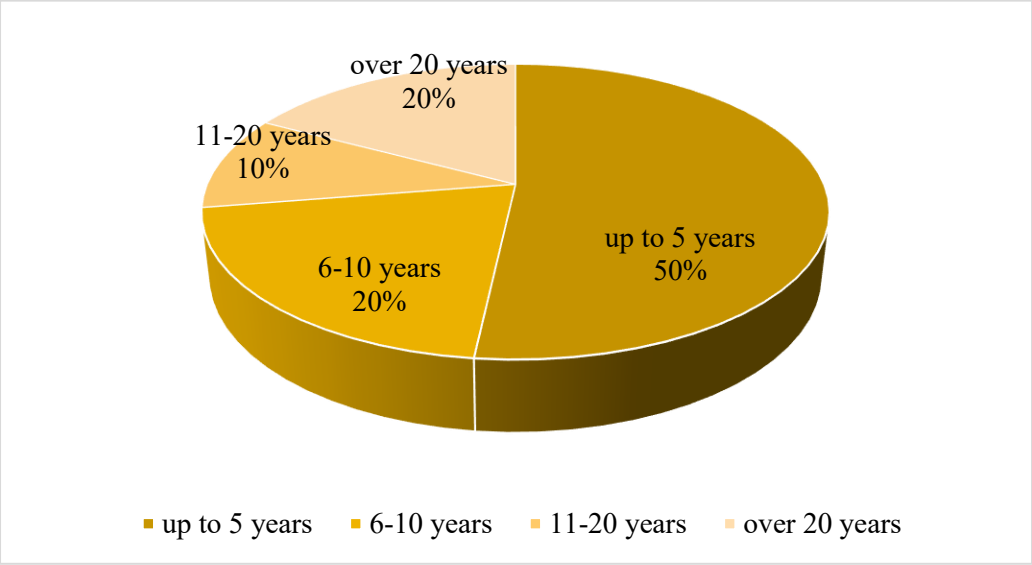


Figure 1 - Teaching Experience of the Participants

The distribution of participants according to teaching experience reveals that the largest proportion of respondents (50%, 15 participants) have up to five years of professional experience.

This suggests a predominance of early-career teachers who may demonstrate greater openness toward the implementation of innovative pedagogical approaches and digital technologies in education.

Teachers with 6–10 years of professional experience represent 20% of the respondents (6 participants), while those with more than 20 years of teaching experience account for 20% (6 participants). The smallest share of participants consists of teachers with 11–20 years of experience – 10 % (3 participants).

The obtained results reveal diversity in the professional background of the respondents, which provides a broader perspective on the application of gamification in chemistry education. At the same time, the predominance of teachers with shorter professional experience may be associated with a greater willingness to adopt interactive and innovative teaching methods.

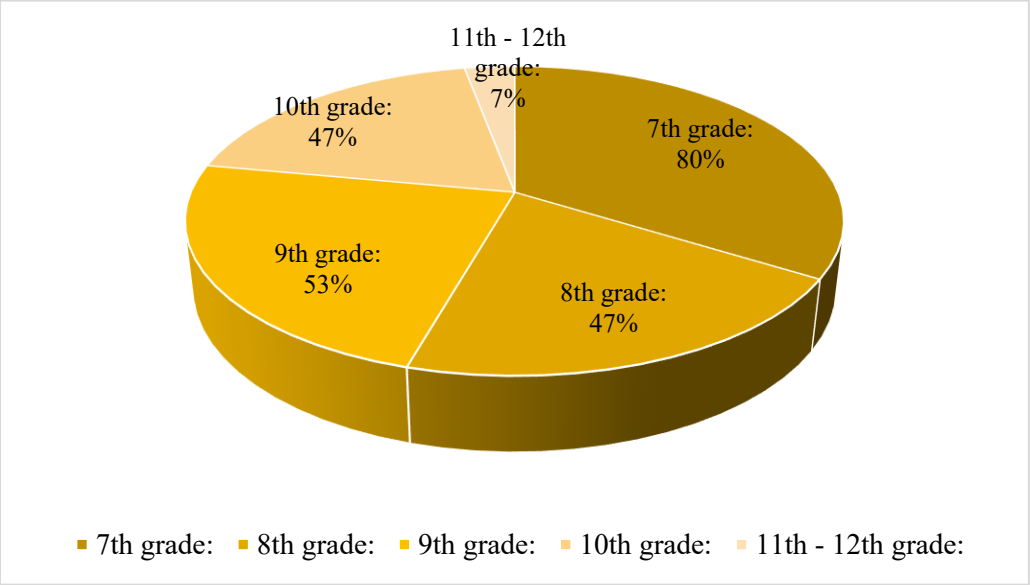


Figure 2 - Grade Levels in Which the Participants Teach Chemistry

As illustrated in Figure 2, the majority of respondents teach chemistry in the 7th grade (80%, 24 participants).

This may be explained by the fact that chemistry is first introduced as a separate subject at this educational stage, which increases the need for engaging and motivating teaching approaches.

A significant proportion of the participants also teach in the 9th grade – 53% (16 participants), followed by the 8th grade – 47% (14 participants), and the 10th grade – 47% (14 participants). Only a small percentage of the respondents teach chemistry in the 11th and 12th grades – 7% (2 participants). Since many respondents teach chemistry at more than one grade level, the percentages exceed 100%.

The results indicate that the study mainly reflects the perspectives of teachers working in lower and upper secondary education, where maintaining students' motivation and interest in chemistry is particularly important. This makes the investigation of gamification as an innovative teaching approach especially relevant in the context of chemistry education.

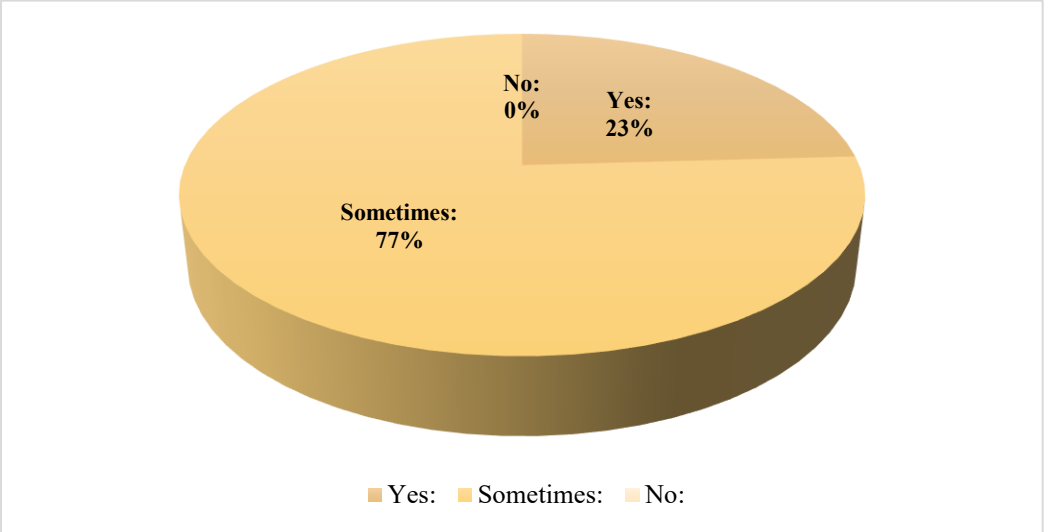


Figure 3 - Use of Gamification Elements in Chemistry Education

Teachers' responses regarding the use of gamification indicate that all participants incorporate game-based elements into their chemistry teaching practice to some extent. The majority of the participants – 77% (23 teachers) – report that they sometimes incorporate game-based elements into their teaching practice, while 23% (7 teachers) state that they regularly use such approaches. Notably, none of the respondents selected the option "No".

These findings demonstrate a generally positive attitude toward the implementation of gamification in chemistry education. The fact that all surveyed teachers apply game elements at least occasionally suggests growing recognition of the potential of gamified approaches to enhance student motivation, engagement, and active participation in the learning process.

At the same time, the predominance of the response "sometimes" may indicate that, although teachers acknowledge the benefits of gamification, its implementation is still not fully integrated into everyday teaching practice. This could be related to factors such as limited time, insufficient resources, or the need for additional methodological support and training.

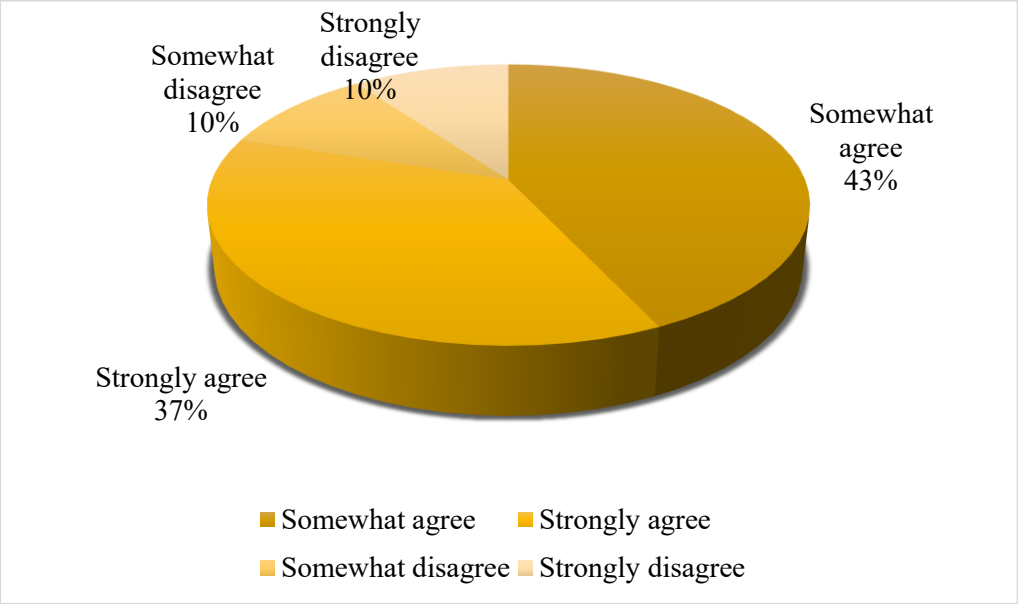


Figure 4 - Gamification Increases Students' Motivation

Teachers expressed predominantly positive views regarding the impact of gamification on students' motivation in chemistry education. The largest proportion of respondents (43%) somewhat agreed that gamification increases students' motivation, while 37% strongly agreed with the statement. In contrast, only 10% somewhat disagreed and another 10% strongly disagreed. These findings suggest that most teachers perceive gamification as an effective approach for enhancing students' motivation and engagement in the learning process. The positive responses may be associated with the interactive and stimulating nature of game-based elements, which can contribute to greater student interest, participation, and willingness to learn chemistry. The results also support the idea that gamification has the potential to create a more engaging and supportive educational environment, which is particularly important in subjects that students often perceive as difficult or abstract, such as chemistry.

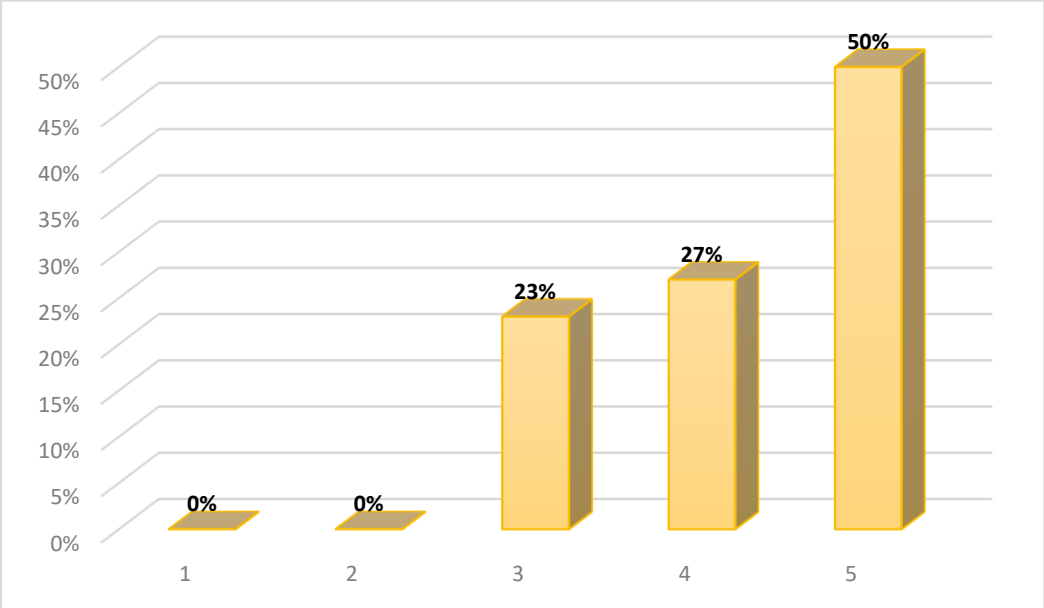


Figure 5 - Gamification Improves Understanding of the Learning Material

Teachers generally perceived gamification as an effective tool for supporting students' understanding of chemistry content. More than half of the respondents (50%, 15 participants) selected the highest rating (5), indicating strong agreement with the statement. Additionally, 27% (8 participants) evaluated the statement with a rating of 4, while another 23% (7 participants) selected the neutral option (3). Notably, no respondents chose the lowest ratings (1 or 2), which suggests the absence of negative attitudes toward the educational effectiveness of gamification. These findings demonstrate that teachers generally perceive gamified approaches as supportive tools for facilitating students' comprehension of chemistry concepts. The positive evaluations may be related to the interactive and engaging nature of game-based activities, which can help students better visualize abstract concepts, maintain attention, and actively participate in the learning process. The results further suggest that gamification may contribute not only to increased motivation but also to more effective knowledge acquisition and understanding of complex educational content in chemistry.

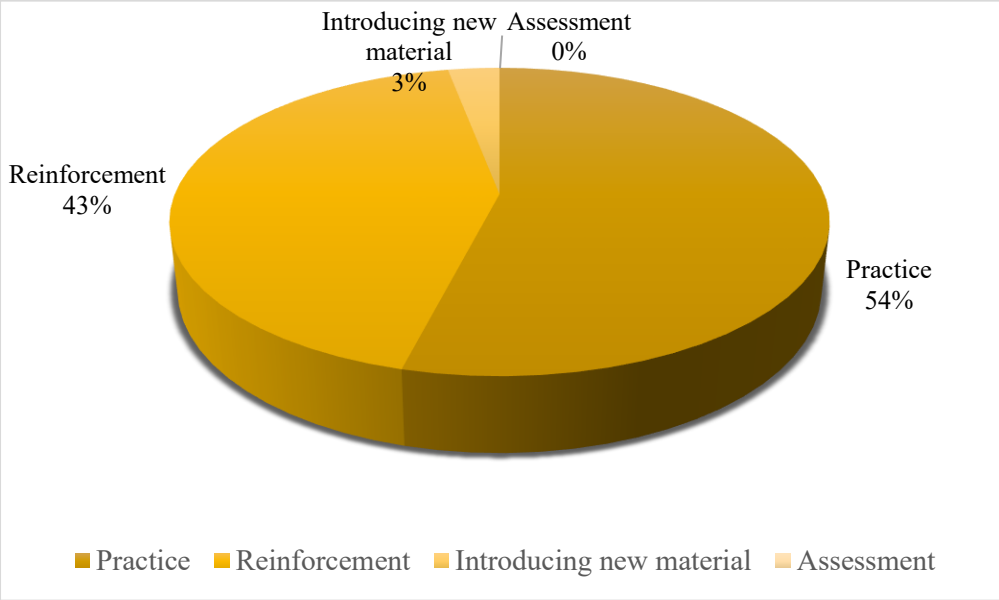


Figure 6 - The Most Appropriate Use of Gamification in Chemistry Education

Respondents most frequently identified practice and reinforcement activities as the most appropriate contexts for the use of gamification in chemistry education. More than half of the participants (54%) indicated that game-based approaches are most effective when used for practice exercises, while 43% associated gamification primarily with the consolidation and reinforcement of learning material. Only 3% of the respondents considered gamification most appropriate for introducing new content, whereas none of the participants selected assessment as the primary area of application. These findings suggest that teachers mainly view gamification as a supportive instructional strategy that enhances active participation and helps students strengthen and apply previously acquired knowledge. The preference for using gamification during practice and reinforcement activities may be related to the interactive nature of game-based tasks, which encourage repetition, collaboration, and problem-solving in a more engaging learning environment.

The absence of responses related to assessment may indicate that teachers still perceive gamification primarily as a motivational and instructional tool rather than a formal evaluation method. Overall, the results demonstrate that gamification is regarded as particularly effective in supporting student engagement and reinforcing understanding in chemistry education.

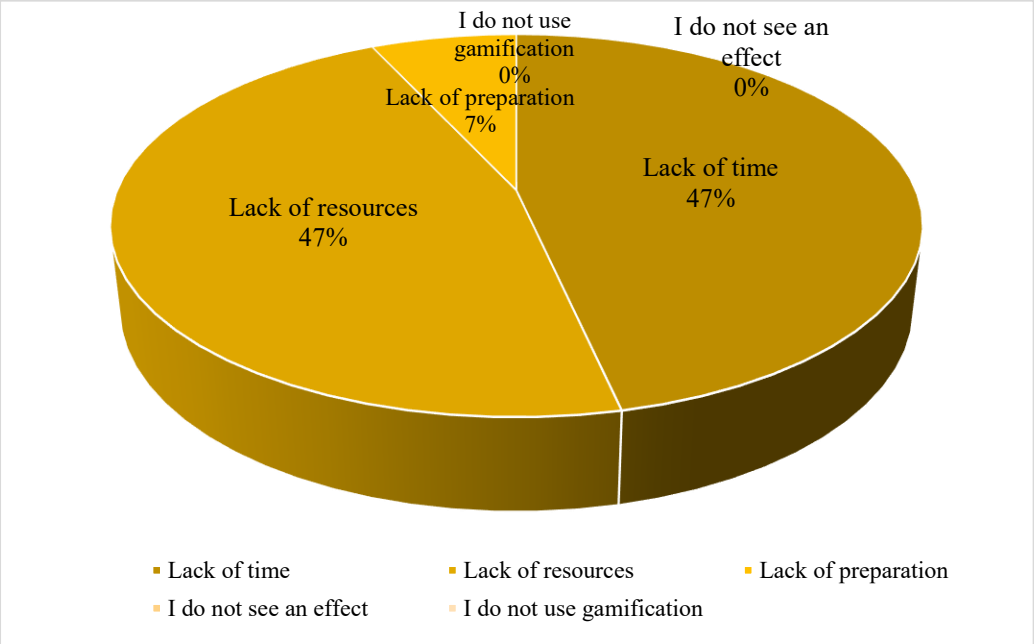


Figure 7 - Difficulties Encountered When Using Gamification

Several challenges related to the implementation of gamification were identified by the participating teachers, with limited time and insufficient resources emerging as the most frequently reported barriers. Nearly half of the respondents (47%) identified lack of time as the primary challenge, while another 47% indicated lack of resources as a significant obstacle. A much smaller proportion of participants (7%) reported insufficient preparation as a difficulty. None of the respondents selected the options "I do not see an effect" or "I do not use gamification."

5. Discussion

The findings of the present study demonstrate generally positive attitudes among chemistry teachers toward the implementation of gamification in chemistry education. The results indicate that teachers perceive gamified approaches as valuable pedagogical tools that can enhance students' motivation, engagement, and understanding of chemistry concepts. These findings are consistent with previous studies emphasizing the positive influence of gamification on learners' participation, academic interest, and learning experiences within STEM education (Kapp, 2012; Hamari et al., 2014; Christopoulos & Mystakidis, 2023).

An important finding of the study is that all participating teachers reported using gamification elements in their teaching practice, at least occasionally. This suggests a growing awareness of the educational potential of gamified learning environments among chemistry teachers. However, the fact that the majority

of respondents indicated only occasional use of gamification may reflect the transitional stage of its implementation in educational practice. Although teachers recognize the benefits of game-based strategies, their integration into regular classroom instruction appears to remain limited. Similar tendencies have been reported in previous studies, where teachers expressed positive attitudes toward innovative pedagogical approaches but faced difficulties in incorporating them systematically into everyday teaching (Jiménez-Valverde et al., 2024).

The results further reveal that most teachers believe gamification contributes significantly to increasing student motivation. This finding is particularly relevant in chemistry education, where students frequently encounter difficulties associated with abstract concepts, symbolic representations, and complex scientific processes. Increased motivation may encourage students to participate more actively in learning activities and to demonstrate greater persistence when confronted with challenging tasks. These findings support the conclusions of Li et al. (2024), whose meta-analysis demonstrated that gamification positively influences intrinsic motivation, autonomy, and students' sense of relatedness.

The positive perceptions regarding motivation can also be interpreted through the framework of Self-Determination Theory. According to this theory, intrinsic motivation develops when learners experience autonomy, competence, and social connectedness. Gamification elements such as challenges, rewards, badges, progression systems, and immediate feedback may satisfy these psychological needs by providing students with opportunities for achievement, self-regulation, and collaboration. Consequently, gamified learning environments may contribute to the creation of more supportive and motivating educational experiences (Ryan & Rigby, 2020).

Another significant result concerns teachers' perceptions of the effectiveness of gamification for improving students' understanding of chemistry content. The majority of respondents evaluated gamification positively in this regard, with no participants expressing negative opinions. This finding suggests that teachers recognize the instructional value of game-based approaches beyond their motivational function. The interactive nature of gamified activities may facilitate the visualization of abstract chemical phenomena, support conceptual understanding, and encourage active knowledge construction. These observations correspond with research highlighting the role of gamification in promoting deeper cognitive engagement and improving learning outcomes in science education (Aliyu, 2025).

The study also provides insights into the contexts in which teachers consider gamification most effective. Respondents predominantly identified practice and reinforcement activities as the most appropriate areas for implementing game-based elements. This finding suggests that teachers perceive gamification primarily as a supportive instructional strategy rather than as a method for introducing new content or conducting formal assessment. Such perceptions may stem from the ability of gamified activities

to encourage repetition, application of knowledge, and collaborative problem-solving in an engaging manner. These characteristics align with contemporary student-centered approaches that emphasize active participation and experiential learning.

Despite the positive attitudes reported by the participants, the study identifies several challenges associated with the implementation of gamification. The most frequently mentioned barriers include lack of time and insufficient educational resources. These obstacles have also been documented in previous studies investigating innovative teaching methods and digital technologies in education. Designing and implementing high-quality gamified activities often requires considerable preparation time, access to appropriate digital tools, and methodological expertise. Therefore, even when teachers recognize the educational benefits of gamification, practical constraints may limit its widespread application.

Interestingly, teachers with shorter professional experience constituted the largest group in the sample. This observation may suggest that early-career teachers are more inclined to experiment with innovative teaching approaches and educational technologies. Although the present study did not directly examine the relationship between teaching experience and attitudes toward gamification, this trend may represent an important direction for future research. Investigating how professional experience influences teachers' willingness to adopt gamified approaches could contribute to a better understanding of the factors affecting educational innovation.

Overall, the findings highlight the importance of providing teachers with professional development opportunities, methodological guidance, and access to appropriate educational resources. Such support may facilitate the more effective integration of gamification into chemistry education and encourage its systematic use in classroom practice. As educational systems continue to emphasize student engagement, active learning, and STEM competency development, gamification may become an increasingly valuable component of contemporary chemistry instruction.

Although the findings provide useful insights into teachers' perceptions, several limitations should be acknowledged. The relatively small sample size and the focus on a specific educational context limit the generalizability of the results. In addition, the study relies exclusively on self-reported data, which may be influenced by subjective perceptions and personal experiences. Future research could include larger and more diverse samples, employ mixed-methods designs, and investigate the direct impact of gamification on students' academic achievement, motivation, and long-term engagement in chemistry learning.

6. Conclusion

The present study highlights the positive attitudes of chemistry teachers toward the implementation of gamification in the educational process. The obtained results indicate that teachers perceive game-based

elements as effective tools for increasing students' motivation, engagement, and understanding of the learning material.

The findings reveal that the majority of teachers use gamification at least occasionally in their teaching practice, particularly during practice and reinforcement activities. According to the respondents, gamified approaches contribute to creating a more interactive, engaging, and student-centered learning environment in chemistry education.

At the same time, the study identifies several challenges related to the implementation of gamification. The most frequently reported difficulties include lack of time and insufficient educational resources. Despite these obstacles, none of the participants questioned the effectiveness of the gamified approach, which demonstrates generally positive professional attitudes toward its application in chemistry teaching.

Overall, the results of this pilot study indicate that gamification represents a promising pedagogical strategy for chemistry education. From the perspective of practicing teachers, game-based elements have the potential to enhance student motivation, promote active engagement, and support the understanding of complex chemistry concepts. The findings contribute to the growing body of research on innovative STEM teaching approaches and provide preliminary evidence for the educational value of gamification in the Bulgarian context. Future studies should further explore the long-term effects of gamification on students' academic achievement, scientific literacy, and attitudes toward chemistry through larger-scale and mixed-methods research designs.

References:

Aliyu, H. (2025). Transforming Chemistry Education by Engaging Students Actively and Experientially to Foster Deeper Understanding and Lasting Scientific Curiosity. Rima, 4(3).

Benjamin, A. (2024). Studying the student's perceptions of engagement and problem-solving skills for academic achievement in chemistry at the higher secondary level. Education and Information Technologies, 29(7), 8347–8368.

Bhardwaj, V., Zhang, S., Tan, Y. Q., & Pandey, V. (2025, February). Redefining learning: Student-centered strategies for academic and personal growth. In Frontiers in Education (Vol. 10, p. 1518602). Frontiers Media SA.

Christopoulos, A., & Mystakidis, S. (2023). Gamification in education. Encyclopedia, 3(4), 1223–1243.

De Loof, H., Struyf, A., Boeve-de Pauw, J., & Van Petegem, P. (2021). Teachers' motivating style and students' motivation and engagement in STEM: The relationship between three key educational concepts. Research in Science Education, 51(Suppl 1), 109–127.

Gaurina, M., & Pavlin, J. (2025). Teachers' Knowledge and Beliefs about Gamification in Physics Classrooms. Journal of Baltic Science Education, 24(2), 255–270.

Hamari, J., Koivisto, J., & Sarsa, H. (2014). Does Gamification Work? A Literature Review of Empirical Studies on Gamification. Proceedings of the 47th Hawaii International Conference on System Sciences, 3025–3034.

Jiménez-Valverde, G., Heras-Paniagua, C., Fabre-Mitjans, N., & Calafell-Subirà, G. (2024). Gamifying teacher education with FantasyClass: Effects on attitudes towards physics and chemistry among preservice primary teachers. Education Sciences, 14(8), 822.

Kapp, K. M. (2012). The Gamification of Learning and Instruction: Game-Based Methods and Strategies for Training and Education. Pfeiffer.

Li, L., Hew, K. F., & Du, J. (2024). Gamification enhances student intrinsic motivation, perceptions of autonomy and relatedness, but minimal impact on competency: A meta-analysis and systematic review. Educational Technology Research and Development, 72(2), 765–796.

Llorens-Largo, F., Gallego-Durán, F. J., Villagrá-Arnedo, C. J., Compañ-Rosique, P., Satorre-Cuerda, R., & Molina-Carmona, R. (2016). Gamification of the learning process: Lessons learned. IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje, 11(4), 227–234.

Moseikina, M., Toktamysov, S., & Danshina, S. (2022). Modern technologies and gamification in historical education. Simulation & Gaming, 53(2), 135–156.

Paunova-Hubenova, E., Bontchev, B., Terzieva, V., & Dankov, Y. (2025). Teachers' views on STEM education in Bulgaria: A qualitative survey. Education Sciences, 15(9), 1155.

Ryan, R. M., & Rigby, C. S. (2020). Motivational foundations of game-based learning. In Handbook of Game-Based Learning (pp. 153–176).

Sharma, A. V. N. S., Jayalakshmi, S., Tripathy, A., Katekhaye, D., & Sharma, A. (2024). Exploring innovative pedagogical approaches for enhanced student engagement. Decision Making: Applications in Management and Engineering, 7(1), 175–188.

НАГЛАСИ НА УЧИТЕЛИТЕ КЪМ ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ИНТЕЛИГЕНТНИ ОБРАЗОВАТЕЛНИ ПОМОЩНИЦИ В УЧИЛИЩНОТО ОБУЧЕНИЕ

Катерина Калайджиева, Костадин Самарджиев

Югозападен университет „Неофит Рилски“, Природо-математически факултет, Благоевград, България

РЕЗЮМЕ

Настоящата статия разглежда нагласите на учителите към използването на интелигентни образователни помощници в училищното обучение. Представени са резултати от анкетно проучване, проведено сред 150 учители от различни учебни предмети и образователни нива. Изследването е насочено към честотата на използване на AI инструменти, възприеманите ползи, дигиталната компетентност на учителите и основните притеснения, свързани с използването на подобни технологии. Резултатите показват, че интелигентните образователни помощници вече са част от реалната образователна практика и учителите постепенно разпознават потенциала им за подпомагане на обучението. Наред с положителните нагласи се открояват и опасения, свързани със злоупотреба и неправилно използване на технологиите.

КЛЮЧОВИ ДУМИ: изкуствен интелект, интелигентни образователни помощници, образователни технологии, учители, дигитална компетентност

TEACHER ATTITUDES TOWARDS THE USE OF INTELLIGENT EDUCATIONAL ASSISTANTS IN SCHOOL EDUCATION

Katerina Kalaydzhieva, Kostadin Samardzhiev

South-West University "Neofit Rilski", Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Blagoevgrad, Bulgaria

ABSTRACT

This article examines teachers' attitudes towards the use of intelligent educational assistants in school education. The study presents results from a survey conducted among 150 teachers from different

subject areas and educational levels. The research focuses on the frequency of AI tool usage, perceived benefits, teachers' digital competence, and concerns related to the use of such technologies. The results indicate that intelligent educational assistants are already part of contemporary educational practice and teachers gradually recognize their potential to support the learning process. Alongside the positive attitudes, concerns related to misuse and inappropriate use of technology are also identified.

KEYWORDS: artificial intelligence, intelligent educational assistants, educational technologies, teachers, digital competence

1. Увод

През последните години развитието на изкуствения интелект оказва все по-силно влияние върху различни области на обществения живот, включително и върху образованието. Интелигентните образователни помощници постепенно навлизат в учебния процес и започват да се използват както от учители, така и от ученици.

Технологии като ChatGPT, PhotoMath, GeoGebra и различни AI инструменти за създаване на съдържание предоставят нови възможности за подготовка на учебни материали, обяснение на учебно съдържание и подпомагане на учебния процес. В същото време бързото навлизане на тези технологии поражда различни въпроси, свързани с тяхното ефективно и отговорно използване. Част от учителите възприемат интелигентните помощници като възможност за улесняване на преподаването, докато други изразяват притеснения относно злоупотреба, преписване и намаляване на самостоятелната работа на учениците. В този контекст възниква необходимостта от изследване на нагласите на учителите към използването на интелигентни образователни помощници в училищното обучение.

Използването на генеративен изкуствен интелект в образованието предлага значителни възможности за персонализиране на обучението и подпомагане на преподавателската дейност, но същевременно поставя въпроси, свързани с етиката, академичната честност и необходимостта от ясни правила за неговото приложение (Holmes & Miao, 2023). Нарастващият интерес към тези технологии води и до необходимост от по-задълбочено изследване на нагласите на учителите, които са основен фактор за успешното им интегриране в образователната практика.

2. Теоретична рамка

Интелигентните образователни помощници представляват дигитални инструменти, базирани на изкуствен интелект, които подпомагат обучението чрез генериране на съдържание, предоставяне на

обратна връзка, препоръки и персонализирана подкрепа. Сред най-разпространените инструменти са ChatGPT, PhotoMath, GeoGebra и други приложения, използвани както от учители, така и от ученици.

Съвременното обучение се осъществява в условията на разнообразни образователни потребности и индивидуални различия между учениците, което предполага използването на подходи, съобразени с техните възможности и потребности (Томлинсън, 2014). Ефективното обучение изисква активно участие на ученика в процеса на усвояване на знанията и използване на разнообразни средства за подпомагане на познавателната дейност (Андреев, 2001).

Според Holmes и Miao (2023) внедряването на изкуствен интелект в образованието следва да бъде обвързано с ясни педагогически цели, защита на личните данни и съхраняване на водещата роля на учителя в учебния процес.

Интересът към приложението на AI в образованието нараства значително през последните години. Zawacki-Richter, Marín, Bond и Gouverneur (2019) отбелязват, че изкуственият интелект се превръща в една от най-бързо развиващите се области в образователните технологии, като основните изследвания са насочени към персонализираното обучение, интелигентните обучаващи системи и автоматизираната обратна връзка.

Следователно съвременните изследвания показват едновременно наличие на положителни нагласи към използването на AI и необходимост от създаване на ясни педагогически рамки за неговото приложение в образованието. Въпреки нарастващия интерес към използването на AI в образованието, изследванията, насочени към нагласите на учителите в училищна среда, продължават да се развиват и представляват актуално направление на научните търсения. Това обуславя необходимостта от провеждане на емпирични проучвания, които да изследват реалните практики и възприятия на педагогическите специалисти.

3. Методика на изследването

За целите на изследването е проведено анкетно проучване чрез Microsoft Forms. В него участват 150 учители от различни учебни предмети и образователни нива. Изследването е реализирано чрез количествен подход с цел проследяване на нагласите и практиките, свързани с използването на интелигентни образователни помощници.

Анкетата включва въпроси, свързани с:

- честотата на използване на AI инструменти;
- самооценка на дигиталната компетентност;
- възприемани ползи;

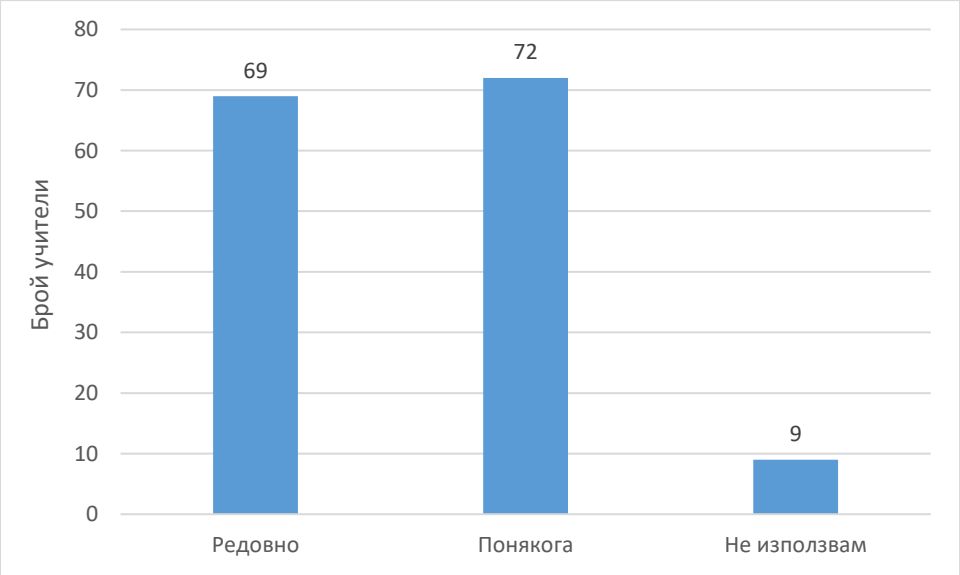
– рискове и притеснения при използването на AI в обучението.

Събраните данни са обработени и анализирани чрез сравнителен и описателен анализ.

4. Резултати от изследването

Използване на AI от учителите

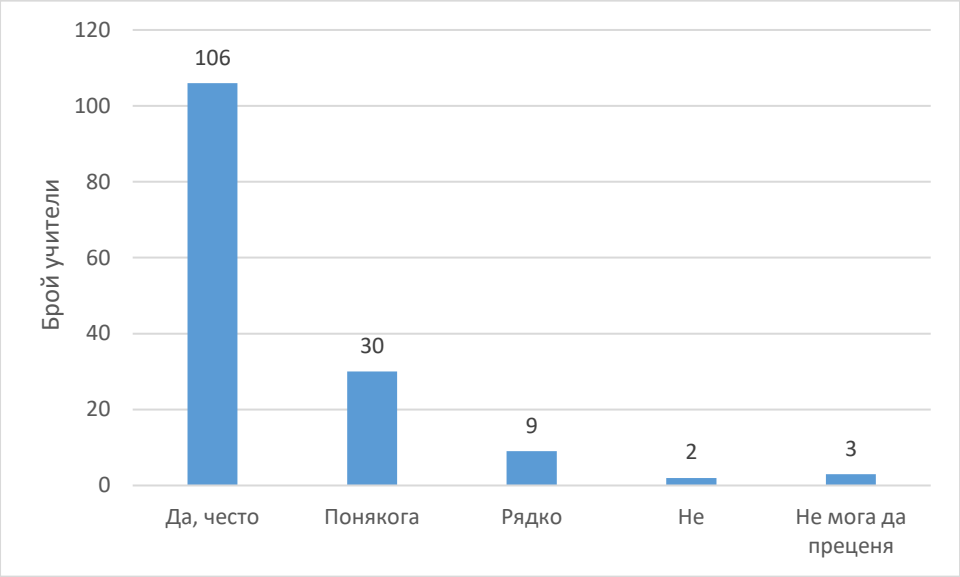
Резултатите показват, че 69 учители използват интелигентни помощници редовно, 72 – понякога, а само 9 не използват подобни технологии. Тези резултати показват, че AI инструментите вече присъстват реално в преподавателската практика.



Фигура 1 – Използване на AI от учителите

Използване на AI от учениците според учителите

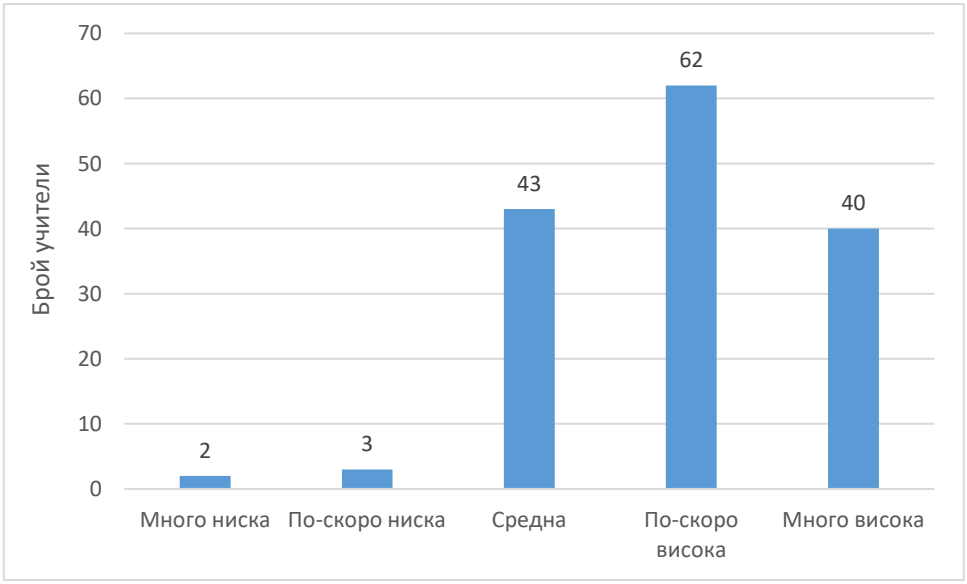
Според 106 от участниците учениците често използват интелигентни образователни помощници в учебния процес. Това показва, че технологиите вече са част от ежедневната учебна среда.



Фигура 2 – Използване на AI от учениците според учителите

Дигитална компетентност на учителите

Повечето учители определят дигиталната си компетентност като средна към висока. Това показва наличие на готовност за работа с нови технологии и интегрирането им в учебния процес.



Фигура 3 – Дигитална компетентност на учителите

Ползи и рискове

Сред основните ползи учителите посочват улесняване на подготовката на уроци, бърз достъп до информация и възможност за подпомагане на обучението. Наред с това се открояват и някои рискове, свързани със злоупотреба, преписване и прекомерна зависимост от технологиите.

5. Анализ на резултатите

Получените резултати показват, че интелигентните образователни помощници постепенно се превръщат в част от съвременната образователна среда. Данните сочат, че по-голямата част от анкетираните учители използват AI инструменти редовно или поне от време на време, което потвърждава тенденцията за нарастващо навлизане на тези технологии в образователната практика.

Резултатите показват също, че учителите оценяват своята дигитална компетентност като средна към висока. Това предполага наличие на готовност за използване на нови технологии и създава предпоставки за по-широкото им интегриране в учебния процес. Този резултат може да се разглежда като предпоставка за по-успешно интегриране на интелигентни образователни помощници в учебния процес, тъй като готовността за работа с технологии е важен фактор за тяхното ефективно използване.

Наред с положителните нагласи се наблюдават и определени притеснения. Най-често посочваните рискове са свързани с механично преписване, намаляване на самостоятелната работа на учениците и прекомерна зависимост от технологиите. Получените резултати показват, че наред с възприеманите ползи учителите осъзнават необходимостта от отговорно и балансирано използване на интелигентните образователни помощници.

Анализът показва, че учителите не отхвърлят използването на интелигентни образователни помощници. Напротив, те разпознават техния потенциал за подпомагане на обучението, но същевременно подчертават необходимостта от ясни правила, методически насоки и балансиран подход при използването им в училищна среда.

6. Заключение

Интелигентните образователни помощници постепенно се превръщат в част от съвременното училищно обучение. Резултатите от проведеното изследване показват, че учителите разпознават ползите от използването на AI инструменти и все по-често ги включват в своята практика.

Наред с положителните нагласи обаче се открояват и притеснения, свързани с неправилно използване на технологиите и намаляване на самостоятелната работа на учениците. В този контекст използването на интелигентни образователни помощници изисква внимателен, балансиран и отговорен подход.

Използвана литература:

Андреев, М. (2001). *Дидактика*. София.

Томлинсън, К. А. (2014). *Диференцирано обучение в хетерогенна класна стая*. София: Раабе България.

Holmes, W., & Miao, F. (2023). *Guidance for generative AI in education and research.* Unesco Publishing.

Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). *Systematic Review of Research on Artificial Intelligence Applications in Higher Education. International Journal of Educational Technology in Higher Education, 16(39). https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0*

APPROBATION OF A PROJECT-BASED LEARNING MODEL IN 10TH GRADE PHYSICS AND ASTRONOMY: THE SECTION "LIGHT"

Anastasia Guenova[a], Ralitsa Stanoeva[a,b]

[a] *South-West University "Neofit Rilski", 66 Ivan Mihaylov St., Blagoevgrad, 2700, Bulgaria*
[b] *Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, 72 Tsarigradsko Chaussee Blvd, Sofia, 1784, Bulgaria*

ABSTRACT

The article presents the approbation of a methodological model for applying project-based learning in 10th grade Physics and Astronomy within the section "Light". The model was implemented in a vocational high school in Sofia, Bulgaria during an eight-week period. Two 10th grade classes participated in the study: an experimental class, in which the project-based approach was applied, and a control class, which studied the same content through the regular instructional approach. The project-based work included short topic-related tasks and one integrative project focused on the role of light in the home and the design of lighting fixtures, lamps, models and presentations. The results from the motivation questionnaires and the assessment test on the section "Light" indicate a positive tendency in favour of the experimental class. The approbation shows that project-based learning can support students' motivation, active participation, conceptual understanding and practical application of knowledge when it is carefully planned and connected with the curriculum content.

KEYWORDS: Project-based learning, Physics and Astronomy, light, 10th grade, methodological model, motivation, competence-based education

1. Introduction

Contemporary education increasingly emphasises the need to develop competences that allow students to apply knowledge in meaningful situations. This is particularly important in Physics and Astronomy, where learners are expected to understand abstract concepts, interpret phenomena, use models, solve problems and connect scientific explanations with real-life applications. In this context, project-based learning offers opportunities for organising the educational process in a more active and student-centred way.

The present article discusses the approbation of a methodological model for applying project-based learning in 10th grade Physics and Astronomy within the section "Light". The topic was selected because

the section includes phenomena that can be observed, visualised, demonstrated and connected with everyday life and modern technologies. Reflection, refraction, dispersion, diffraction, thermal radiation and the photoelectric effect allow students to work with different models of light and to understand its practical importance in various contexts.

The aim of the article is to present the organisation, implementation and results of the approbated project-based model. The focus is placed on the way the model was applied in a real school environment, the types of project tasks used, the comparison between the experimental and control classes, and the observed effects on students' motivation and achievement.

2. Project-Based Learning as a Methodological Approach

Project-based learning is an educational approach in which students acquire and apply knowledge through work on a meaningful task, problem or product. In this approach, the project is not an additional activity at the end of the lesson, but part of the learning process itself. Students investigate, plan, create, present and reflect, while the teacher organises, guides and evaluates the process. (Kokotsaki, 2016)

In Physics and Astronomy, project-based learning can be especially useful because it allows theoretical knowledge to be connected with observation, experimentation, visualisation and application. Instead of studying physical concepts only through definitions and formulas, students are placed in situations in which they have to use these concepts in order to explain a phenomenon or create a product. This supports the formation of conceptual, experimental, analytical, communicative and collaborative competences.

The section "Light" is suitable for the application of project-based learning because it includes both accessible and more complex phenomena. On the one hand, students can observe and demonstrate reflection, refraction, colour and shadow through simple examples. On the other hand, they can also work with more abstract topics such as diffraction, thermal radiation and the quantum properties of light. This allows the teacher to organise tasks with different levels of complexity and to connect the learning content with students' interests and practical experience.

3. Description of the Methodological Model

The methodological model was designed for implementation in 10th grade Physics and Astronomy during the study of the section "Light". It included clearly defined objectives, organisation of project work, stages of implementation, roles of the teacher and students, assessment criteria and expected results. The model aimed to support active participation, better understanding of the studied phenomena, practical application of knowledge, teamwork and reflection.

The model was based on the idea that students should gradually move from understanding and applying knowledge toward analysing, evaluating and creating. (Biggs, 2015). For this reason, the project activities were not introduced as isolated creative tasks, but as structured learning activities connected with the curriculum content. The teacher's role was to guide the process, clarify scientific concepts, support teamwork, give feedback and ensure that the final products were not only visually attractive, but also scientifically meaningful. (Black & William, 1998)

The project-based work included two types of tasks. The first type consisted of shorter project-oriented tasks connected with specific lesson topics from the section "Light". These tasks had a preparatory function and helped students work actively with particular phenomena. The second type was a larger integrative project, which required students to apply knowledge from the whole section in a practical and creative context.

4. Organisation of the Approbation

The approbation of the project-based approach was conducted during the second school term in a vocational high school in Sofia. The implementation lasted six weeks. The choice of this period was determined by the annual distribution of the Physics and Astronomy curriculum, according to which the section "Light" is studied during the second term. Physics and Astronomy was taught two hours per week, which required the project activities to be planned in a realistic way within the regular educational process.

Two 10th grade classes participated in the study. Each class consisted of 28 students. One class was selected as the experimental class, in which the project-based approach was applied, while the other class served as the control class and studied the same section through the regular instructional approach. The choice of the two classes was based on their comparable academic performance during the first school term. Both classes had an average achievement of approximately 4.50 in Physics and Astronomy, which made them suitable for comparison.

In the control class, the section "Light" was taught through the regular instructional approach. The lessons included explanation of new material, work with the textbook, discussion of examples, solving problems and teacher-led clarification of the main concepts. In the experimental class, the same curriculum content was studied, but the learning process was enriched through project-oriented tasks and one larger integrative project.

Table 1 – Characteristics of the Participating Classes

Class	**Number Of Students**	**Role In The Study**	**Average Achievement From First Term**	**Instructional Approach**

10th grade class A	28	Experimental class	Approximately 4.50	Project-based approach
10th grade class B	28	Control class	Approximately 4.50	Regular instructional approach

5. Project Tasks in the Section "Light"

The project-based work in the experimental class included shorter topic-related tasks and one larger integrative project. The shorter tasks were connected with specific topics from the section, such as refraction, total internal reflection, dispersion and applications of light. Their purpose was to help students observe, explain and apply the studied concepts before moving to the final project.

One of the shorter tasks was related to refraction of light in everyday situations. Students were asked to observe and explain a simple example of refraction, using accessible materials or visual documentation. The aim was to connect the concept of refraction with direct observation and to encourage students to explain the phenomenon using appropriate terminology.

Another shorter task was connected with total internal reflection and its applications. Students had to present a selected application of the phenomenon, such as optical fibres, decorative light guides or medical endoscopy, and explain the physical principle behind it. This task helped students understand that a physical phenomenon can have important technological applications.

The central project task was titled "Light in the Home: Designing a Lighting Fixture According to the Characteristics of Light." Students worked in teams and were asked to design and present a lighting fixture, lamp, model or concept for interior lighting. The product had to be connected with selected characteristics of light, such as direction, intensity, colour, shadow, reflection, transparency or diffusion. The task was chosen because it allowed students to connect the topic of light with their everyday environment, practical thinking and creative interests.

Although the final task was not linked to only one specific lesson, it had an integrative function. It required students to use knowledge from the whole section and to apply it in a practical context. The students prepared lamps, models, lighting objects and presentations. During the defence, each team explained its idea, the function of the lighting object, the materials used and the connection between the product and the physical characteristics of light.

6. Assessment and Results

The assessment of the project work was carried out through an analytic rubric. The criteria included scientific accuracy, explanation of the characteristics of light, connection between design and physics,

quality of the practical product or model, application of knowledge, teamwork, presentation and reflection. This made it possible to evaluate not only the final product, but also the way students used physical knowledge and communicated their understanding. (Andrade, 2000)

In addition to the project assessment, data were collected through a motivation questionnaire administered before and after the implementation of the model. The same procedure was applied in both the experimental and the control class. The initial data showed that the two classes had similar levels of motivation before the beginning of the approbation. In both groups, the largest share of students demonstrated a medium level of motivation, while the shares of students with high and very high motivation were relatively close.

After the completion of the section "Light", the results showed a more visible positive change in the experimental class. The share of students with low motivation decreased, while the share of students with high and very high motivation increased. In the control class, the changes were smaller and the distribution remained closer to the initial results. This suggests that the project-based approach had a positive influence on students' motivation and willingness to participate in the learning process.

The results from the assessment test on the section "Light" also showed a positive tendency in favour of the experimental class. The control class achieved an average result of approximately 4.61/6.00, while the experimental class achieved an average result of approximately 5.02/6.00. This difference suggests that the project-based approach supported not only students' motivation, but also their understanding and application of the studied content.

Table 2 – Comparison of Students' Achievement in the Section "Light"

Class	**Number Of Students**	**Average Result From The Assessment Test**
Control class	28	Approximately 4.61
Experimental class	28	Approximately 5.02

The better results of the experimental class can be interpreted in relation to the more active organisation of the learning process. Students in this class worked with the concepts of light through different forms of activity: short project tasks, teamwork, visualisation, practical products, presentations and defence. This allowed them to return to the same concepts several times and to use them in different contexts.

7. Discussion

The conducted approbation indicates that project-based learning can be successfully applied in the section "Light" when the activities are clearly connected with the curriculum content and with the interests

of the students. The vocational school context was especially suitable for the final integrative task, because students were able to combine Physics and Astronomy with design, construction, visual thinking and practical application.

The results show that the project-based approach influenced both motivation and achievement. The increase in higher motivation levels in the experimental class suggests that students responded positively to the opportunity to work in teams, create a visible product and present their ideas. At the same time, the better results in the assessment test indicate that the project activities did not distract from the academic content, but supported its understanding.

It is important to emphasise that the model does not reject traditional teaching methods. Explanation, problem solving and teacher guidance remained necessary parts of the process. The difference was that in the experimental class these elements were combined with project work, practical application and student presentation. This combination appears to have supported a more meaningful learning process.

The study was conducted in a real school environment, which means that the results should be interpreted with caution. The approbation included two classes from one school and lasted six weeks. Nevertheless, the observed positive tendency provides a basis for further development of the model and for its application in other sections of the Physics and Astronomy curriculum.

8. Conclusion

The approbation of the project-based learning model in the section “Light” confirms the potential of this approach for improving the educational process in 10th grade Physics and Astronomy. The model supported active participation, teamwork, practical application of knowledge and the creation of meaningful final products. The comparison between the experimental and control classes showed a positive tendency in favour of the experimental class both in terms of motivation and achievement.

The central integrative task, focused on the role of light in the home and the design of lighting fixtures, proved to be appropriate for the vocational school context. It allowed students to connect the studied physical phenomena with practical situations and personal interests. In this way, the topic of light was presented not only as theoretical content, but as a phenomenon with visible applications in everyday life.

Future development of the model may include the preparation of a complete set of didactic materials: project assignment sheets, planning cards, assessment rubrics, self-assessment forms, peer-assessment forms, teacher observation checklists and examples of student products. The model could also be adapted to other sections of the Physics and Astronomy curriculum, such as mechanics, electricity, thermal phenomena, sound, astronomy and environmental physics. A broader implementation would allow project-

based learning to become a systematic part of the educational process rather than a single isolated activity. (Panadero, 2019)

In conclusion, the conducted approbation shows that project-based learning can be a valuable methodological approach in Physics and Astronomy education when it is carefully planned, guided by the teacher and connected with the curriculum content. It supports the formation of both subject-specific and transferable competences and contributes to a more active, meaningful and motivating learning environment.

References:

Andrade, H. G. (2000). Using rubrics to promote thinking and learning. *Educational Leadership, 57*(5), 13–18.

Biggs, J. (2014). Constructive alignment in university teaching. *HERDSA Review of Higher Education, 1*, 5–22.

Black, P., & Wiliam, D. (1998). Assessment and classroom learning. *Assessment in Education: Principles, Policy & Practice, 5*(1), 7–74.

Kokotsaki, D., Menzies, V., & Wiggins, A. (2016). Project-based learning: A review of the literature. *Improving Schools, 19*(3), 267–277.

Panadero, E., Lipnevich, A. A., & Broadbent, J. (2019). Turning self-assessment into self-feedback. *Educational Psychology Review, 31*, 1–27.

ИНТЕРДИСЦИПЛИНАРЕН ПОДХОД ПРИ ИЗУЧАВАНЕ НА СМЕСИ: ОТ МОЛЕКУЛЯРНА ХИМИЯ ДО STEM ПРИЛОЖЕНИЯ

Камелия Богословова, Сияна Стоименова, Христина Димова

ОУ „ Св. св. Кирил и Методий“, гр. Дупница, 2600, България

РЕЗЮМЕ

Настоящата статия представя интердисциплинарен STEM подход при изучаването на хомогенни и хетерогенни смеси чрез интегриране на знания от химията, биологията и съвременните образователни технологии. Разработен и приложен е модел на урок, включващ дигитална микроскопия и експериментално изследване на колоидни системи с цел формиране на научни представи за структурата и свойствата на смесите. Чрез експеримента „Парадоксът на млякото“ учениците наблюдават микроструктурата на емулсиите и анализират връзката между молекулната организация и физикохимичните свойства на веществата. Представени са възможности за интегриране на придобитите знания с инженерни и екологични приложения, свързани с разделянето на смеси и пречистването на води. Резултатите показват, че прилагането на интердисциплинарния STEM подход подпомага развитието на изследователски умения, критично мислене и разбиране на връзката между фундаменталните природонаучни знания и тяхното практическо приложение.

КЛЮЧОВИ ДУМИ: смеси, хомогенни, хетерогенни, STEM иновация, микроскопия, екология

AN INTERDISCIPLINARY APPROACH TO TEACHING MIXTURES: FROM MOLECULAR CHEMISTRY TO STEM APPLICATIONS

Kamelia Bogoslovova, Siyana Stoimenova, Hristina Dimova

Primary School “St. St. Cyril and Methodius”, Dupnitsa, 2600, Bulgaria

ABSTRACT

This paper presents an interdisciplinary STEM approach to teaching homogeneous and heterogeneous mixtures by integrating knowledge from chemistry, biology, and contemporary educational

technologies. A lesson model incorporating digital microscopy and the experimental investigation of colloidal systems was designed and implemented to promote students' scientific understanding of the structure and properties of mixtures. Through the experiment **"The Milk Paradox,"** students observe the microstructure of emulsions and analyze the relationship between molecular organization and the physicochemical properties of substances. The study also demonstrates opportunities for integrating the acquired knowledge with engineering and environmental applications related to mixture separation and water purification. The results indicate that the implementation of the interdisciplinary STEM approach enhances students' inquiry skills, critical thinking, and understanding of the relationship between fundamental scientific concepts and their practical applications.

KEYWORDS: mixtures; homogeneous mixtures; heterogeneous mixtures; STEM education; digital microscopy; environmental education

1. Въведение

В съвременното природонаучно образование все по-широко приложение намират интердисциплинарните подходи, които интегрират знания и умения от различни научни области с цел изграждане на функционална научна грамотност и развитие на изследователско мислене. STEM обучението (Science, Technology, Engineering and Mathematics) създава условия за свързване на учебното съдържание с практически задачи, като насърчава учениците да прилагат научните знания при решаване на реални проблеми (Johnson & Czerniak, 2023).

Изучаването на хомогенните и хетерогенните смеси заема важно място в обучението по химия, тъй като формира основни представи за строежа, състава и свойствата на веществата (Brady & Senese, 2008). В учебната практика тези понятия често се представят чрез макроскопски наблюдения, което затруднява изграждането на реална представа за структурата на дисперсните системи и колоидите. Използването на дигитална микроскопия предоставя възможност за визуализиране на микроструктурата на веществата и подпомага разбирането на връзката между молекулната организация и наблюдаваните физични свойства.

В настоящото изследване е разработен интердисциплинарен STEM модел на урок, който съчетава знания от химията, биологията и образователните технологии чрез експериментално изследване на различни видове смеси. Особено внимание е отделено на експеримента „Парадоксът на млякото“, чрез който учениците наблюдават микроструктурата на емулсиите и анализират причините за различията между макроскопските и микроскопските характеристики на веществата.

Получените знания се свързват с практически приложения на методите за разделяне на смеси при пречистването на води, управлението на отпадъците и опазването на околната среда. По този начин обучението надхвърля усвояването на теоретични знания и създава условия за развитие на критично мислене, практически умения и инженерна култура у учениците.

1.1. Научна рамка на изследването

Научната рамка на настоящото изследване определя неговите основни методологични характеристики, включително обекта, предмета, целта и задачите, както и научната новост и практическата приложимост на предложения интердисциплинарен STEM модел. Тези елементи са систематизирани в Таблица 1.

Таблица 1 - Научна рамка на изследването

Елемент на изследването	Описание и дефиниция
Обект на изследването	Учебният процес по природни науки в прогимназиален етап, с фокус върху темите за хомогенни и хетерогенни системи.
Предмет на изследването	Интердисциплинарният STEM подход и приложението на дигиталната микроскопия като инструменти за преодоляване на сетивните илюзии при изучаване на материята.
Цел на разработката	Да се проектира, приложи и анализира иновативен модел за STEM урок, който доказва скритата хетерогенност на веществата и свързва молекулярната химия с реални екологични казуси.

1.2. Основни задачи на изследването:

- Теоретичен анализ на молекулярната динамика в хомогенните и хетерогенните смеси.
- Разработване ма методическа структура за STEM урок, базиран на експеримента „ Парадоксът на млякото“.
- Интегриране на дигитални технологии (микроскопия) за визуализация на микроструктурата на колоидните системи.

- Проследяване на междупредметните връзки с екологията чрез анализ на съвременни филтрационни технологии за пречистване на водни басейни.
- Оценка на образователните ефекти от прилагането на модела в реална училищна среда.

Научна новост: Научната новост се състои в деконструирането на традиционното понятие за „еднородност“ чрез достъпни дигитални технологии в училище, превръщайки абстрактните химични понятия в измерими физични и биологични явления.

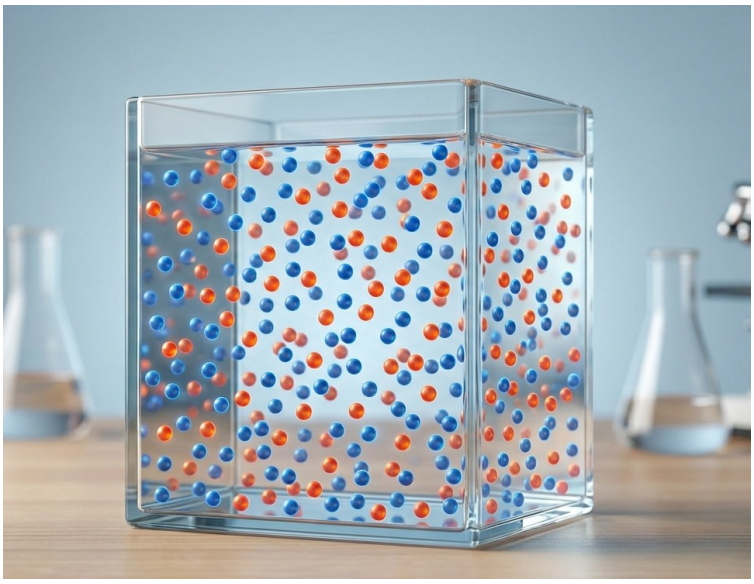
Практическа приложимост: Моделът е напълно репликируем и предоставя готов методически инструментариум за учители, работещи в STEM центрове, като развива уменията за критично мислене, дигитална грамотност и инженерно проектиране у учениците.

2. Теоретична рамка и молекулярна динамика

Теоретичната основа на настоящото изследване се базира на съвременните представи за строежа и свойствата на хомогенните и хетерогенните смеси, както и на особеностите на молекулните взаимодействия, които определят тяхното поведение (Kovács et. all, 2020). Разбирането на процесите, протичащи на молекулно и микроструктурно ниво, е предпоставка за правилното интерпретиране на експерименталните наблюдения и за осмисляне на връзката между структурата на веществата и техните физикохимични свойства. В този контекст дигиталната микроскопия предоставя възможност за визуализиране на дисперсните системи и подпомага изграждането на научни представи за различните видове смеси.

2.1. Молекулярна динамика в хомогенните смеси

В еднородните (хомогенни) смеси молекулите на различни вещества са разпределени равномерно в целия обем. Кинетичната енергия на частиците и междумолекулните взаимодействия (като водородни връзки и ван дер Ваалсови сили) осигуряват стабилност на системата. Класически пример е разтворът на спирт във вода, където частиците се преплитат по начин, който прави отделните компоненти неразличими дори с мощна оптична техника.



Фигура 1 - Равномерно разпределение на молекулите в еднородна смес

На микрониво липсата на фазова граница означава, че свойствата (плътност, индекс на пречупване, концентрация) са идентични във всяка точка от обема на разтвора (Фигура 1).

2.2. Скритата хетерогенност и „Парадоксът на млякото“

Иновацията в учебния процес се състои в използването на дигитална микроскопия за разбиване на сетивните илюзии (Das et. all, 2021). Често веществата изглеждат еднородни с просто око, но на микрониво те са неоднородни (хетерогенни). Млякото е съвършеният интердисциплинарен пример- в биологията то е хранителна течност, а в химията е емулсия.

От гледна точка на физикохимията, млякото представлява полидисперсна система. Микроскопски то проявява свойствата на хомогенна течност, но микроскопският анализ разкрива течна дисперсна фаза (мастни капчици), разпределена в дисперсна среда (водна фаза, съдържаща протеини, лактоза и минерални соли). Този „парадокс“ служи като идеален когнитивен конфликт, който стимулира изследователския интерес на учениците.

3. Методическа част и STEM организация

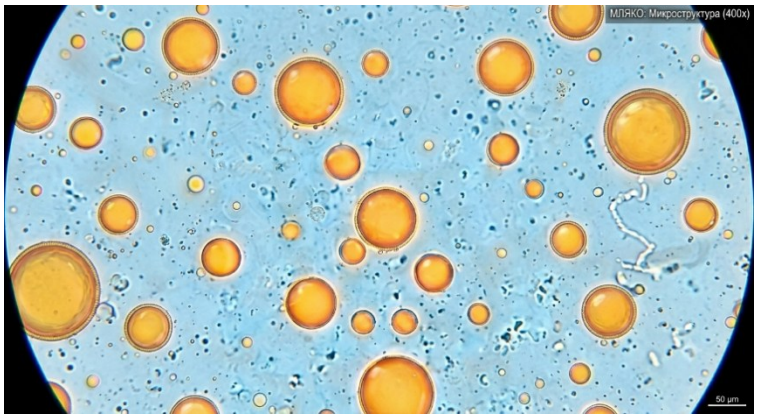
Предложеният модел е реализиран в рамките на блок часове (90 мин.) по интердисциплинарен модул „Природни науки и технологии“. Дейността преминава през четири основни етапа, съответстващи на STEM методологията (Johnson & Czerniak, 2023):

- Етап „Предизвикателство“ (Химия): Учениците изследват микроскопските свойства на вода, спиртен разтвор и мляко. Формулират се хипотези кои системи са хомогенни и кои хетерогенни въз основа на визуални белези.
- Етап “Дигитално изследване“ (Технологии и Биология): Използване на дигитални микроскопи за верификация на хипотезите. Учениците сами подготвят микроскопски препарати от мляко с различен процент масленост.
- Етап „ Екологичен инженеринг“ (Инженерство и Екология): Стимулиране на екологичен проблем (замърсяване с маслени емулсии/микропластмаса) и проектиране на пречиствателни системи.
- Етап „Рефлексия“ : Презентация на инженерните решения и математическо изчисляване на ефективността на филтрацията.

4. Експериментални резултати и анализ

4.1. Микроскопски наблюдения

При изследването на млякото под дигитален микроскоп, учениците ясно наблюдават сферични капчици мазнина, подложени на Броуново движение, разпръснати във водна среда (Das et al., 2021). (*Фиг. 2).*



Фигура 2 - Мляко под микроскоп: Капчици мазнина, разпръснати във водна среда

Анализът на визуалните материали показва, че:

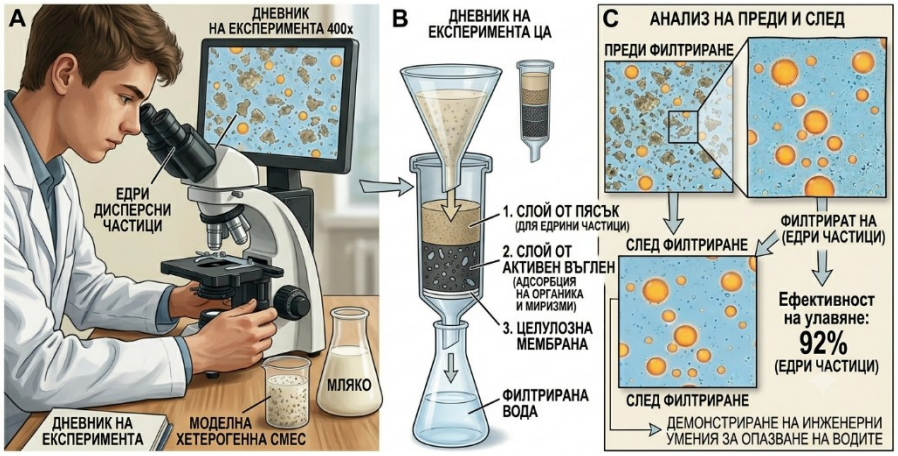
- При мляко с по-ниска масленост (1.5%),гъстотата на мастните глобули е по-малка, а размерите им са по- вариращи поради преминалата технологична хомогенизация.

- При пълномаслено пляко (3.6% и нагоре) се наблюдава наситена мрежа от мастни капчици, което визуално доказва защо колоидните системи имат висок интензитет на разсейване на светлината (ефект на Тиндал).

5. Междупредметни връзки: Екология и технологии

Разбирането за нееднородните смеси е критично за опазването на околната среда. Когато в един литър морска вода се съдържат различни количества соли и примеси, тя става сложна система, чието пречистване изисква STEM базирани филтрационни технологии. Използването на свойствата на смесите позволява на инженерите да проектират системи за улавяне на нефтени разливи и микропластмаса.

В рамките на урока учениците конструираха тристепенни филтри (пясък, активен въглен, целулозна мембрана), за да разделят моделни хетерогенни смеси от вода и примеси. Резултатите показаха 92% ефективност при улавяне на едрите дисперсни частици, което демонстрира как теоретичните знания прерастват в практически инженерни умения за опазване на водните басейни (Фиг.3) (Wakeman & Tarleton, 2005).



Фигура 3 - Експериментално изследване и пречистване на моделна хетерогенна смес

Както е илюстрирано на Фигура 3 (панел А), учениците първоначално анализираха микроструктурата на замърсената моделна смес, идентифицирайки наличието на едри дисперсни частици. На панел В е представена архитектурата на филтрационната система, включваща последователно преминаване през механичен компонент (пясък), адсорбционен слой (активен въглен) и фина целулозна мембрана. Количественият и визуален анализ в панел С категорично

доказва рязкото намаляване на замърсителите във филтрата, потвърждавайки високата ефективност на улавяне от 92% .

6. Дискусия

Провеждането на интердисциплинарният STEM урок и последващият качествен анализ на резултатите разкриват няколко ключови аспекти, свързани с ефективността на предложения модел. Дискусията върху получените данни може да бъде обобщена в три основни направления:

- Преодоляване на когнитивните бариери
- Технологична синергия
- Екологична рефлексия

6.1. Преодоляване на когнитивните бариери и сетивните илюзии

Един от най- значимите образователни ефекти, наблюдавани по време на експеримента „ Парадоксът на млякото“, е успешното разрешаване на когнитивния конфликт у учениците. Преди фазата на дигитално изследване, над 85% от учениците класифицират млякото като „хомогенна смес“ единствено въз основа на неговия микроскопски хомогенен външен вид. Този процент съвпада с теоретичните постановки в педагогическата литература, които посочват, че учениците в прогимназиален етап са силно зависими от непосредствените си сетивни възприятия.

Въвеждането на дигитална микроскопия действа като инструмент за деконструкция на тази сетивна илюзия. Когато учениците наблюдават мастните глобули, суспендирани във водната среда, те преминават през процес на концептуална промяна (*Conceptual Change*) (Posner et al., 1982). Абстрактното химично понятие „емулсия“ и биологичното определение за „хранителна течност“ се сближават, образувайки трайна когнитивна връзка. Дискусията в класната стая доказва, че визуализирането на хетерогеността премахва нуждата от механично запаметяване на дифиниции- учениците започват сами да извеждат свойствата на дисперсните системи въз основа на видяната от тях микроструктура (Фигура 2).

6.2. Анализ на образователните ефекти от STEM подхода

Прилагането на STEM модела в реална образователна среда (ОУ „Св. Св. Кирил и Методий, гр. Дупница) демонстрира качествено нови нива на ангажираност в сравнение с традиционните уроци. Наблюдаваните образователни ефекти могат да бъдат разделени в следните категории:

- Повишена мотивация за учене : Ролята на „изследователи“, в която учениците влизат, променя динамиката в класната стая. Те не са просто пасивни консуматори на информация, а активни създатели на знание.
- Развитие на дигитална грамотност: Самостоятелното приготвяне на микроскопски препарати и работата със софтуера на дигиталните микроскопи развиват практически умения, които надхвърлят рамките на чистата теория.
- Екипна работа и комуникация: Етапът на инженерно проектиране на филтри изискваше разпределяне на роли, споделяне на отговорности и аргументиране на взетите решения в рамките на малки изследователски групи.

6.3. Мост между теорията и практиката: Екологичен инженеринг

Интегрирането на компонента „Екология и технологии“ променя коренно начина, по който учениците възприемат науката химия. В традиционното обучение техниките за разделяне на смеси (филтрация, дистилация, утаяване) често се разглеждат изолирано в лабораторни условия. Чрез поставянето в реалния казус за замърсяването на водните басейни с пластмаси и нефтени продукти, учениците осъзнават глобалното значение на научните познания. Конструирането на тристепенните филтри от ученическите екипи служи като симулация на реални инженерни процеси. По време на дискусията учениците сами стигнаха до извода, че ефективността на един филтър зависи пряко от размера на порите на филтриращия материал и размера на частиците в хетерогенната смес. Това разбиране пренася знанието от ново „възпроизвеждане“ към ниво „трансфер и приложение в нови ситуации“, което е най- високото стъпало в таксономията на Блум (Anderson & Krathwohl, 2001).

6.4. Ограничения на изследването и критичен преглед

Въпреки високата ефективност на модела, дискусията трябва да отчете и някои предизвикателства, свързани с неговото практическо реализиране:

- Технологична обезпеченост: Моделът изисква наличието на функциониращ STEM център или кабинет, оборудван с достатъчен брой дигитални микроскопи, за да може всеки ученик да има директен достъп до технологията.
- Времеви ресурс: Ограничението от стандартен учебен час е недостатъчно за пълното разгръщане на четирите етапа на STEM подхода, което налага организирането на учебния процес в блок часове (90 минути) или в рамките на извънкласни дейности.

6.5. Сравнителен анализ на методическите подходи

За по-ясно представяне на образователните предимства на предложения интердисциплинарен STEM модел е извършен сравнителен анализ с традиционния подход при изучаването на смеси. Сравнението обхваща основни педагогически и методически показатели, свързани с ролята на ученика, нивото на познавателна активност, степента на интердисциплинарност, използването на съвременни технологии и връзката между учебното съдържание и реалните практически приложения. Основните характеристики на двата подхода са представени в Таблица 2.

Таблица 2 - Сравнителен анализ между традиционния и предложения STEM модел на обучение

Критерии за сравнение	**Традиционен подход**	**Предложен STEM изследователски модел**
Роля на ученика	Пасивен слушател/рецептор на дефиниции	Активен изследовател/Инженер
Когнитивно ниво	Запаметяване и възпроизвеждане	Критично мислене, анализ и трансфер на знания
Интердисциплинарност	Слаба (предметите са изолирани)	Силна (Химия + Биология + Технологии + Екология)
Технологична интеграция	Статични изображения в учебника	Дигитална микроскопия в реално време
Връзка с реалния живот	Абстрактивни или остарели примери	Актуални екологични казуси(микропластмаса, пречистване)

В заключение, дискусията потвърждава, че преходът от молекулярна химия към STEM приложениячрез дигитална визуализация не просто улеснява усвояването на сложни научни концепции, но и формира у подрастващите екологична култура и инженерно мислене, необходими за решаване на проблемите на утрешния ден.

7. Заключение и бъдещи насоки

Настоящото изследване демонстрира възможностите на интердисциплинарния STEM подход за обогатяване на обучението по природни науки чрез интегриране на знания от химията, биологията и съвременните образователни технологии. Използването на дигитална микроскопия и експерименталното изследване на колоидни системи подпомагат формирането на по-задълбочени научни представи за структурата и свойствата на хомогенните и хетерогенните смеси, като същевременно насърчават активното участие на учениците в учебния процес. Експериментът „Парадоксът на млякото“ създава условия за осмисляне на връзката между микроструктурата на веществата и техните физикохимични свойства, а включването на екологични и инженерни казуси разширява приложния контекст на придобитите знания. По този начин обучението допринася за развитието на критично мислене, изследователски умения, дигитална грамотност и способност за решаване на практически проблеми. В бъдеще предложеният модел може да бъде доразвит чрез включване на софтуер за количествен анализ на микроскопски изображения, както и чрез прилагането му при изучаването на други видове дисперсни системи и природонаучни теми. Това би разширило възможностите за провеждане на ученически изследвания и за по-ефективно интегриране на STEM подхода в училищната практика.

Този вариант е по-балансиран, следва съдържанието на статията и завършва с реалистични перспективи за бъдещо развитие на предложения модел.

Използвана литература:

Anderson, L. W., & Krathwohl, D. R. (Eds.). (2001). *A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing: A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives*. New York: Longman.

Brady, J. E., & Senese, F. (2008). *Chemistry: The Study of Matter and Its Changes*. John Wiley & Sons.

Das, R., Shankar, B. U., Chakraborty, T., & Ghosh, K. (2021). *Automatic grain segmentation in cross-polarized photomicrographs of sedimentary rocks using psychophysics inspired models*. *Innovations in Systems and Software Engineering, 17*(2), 167–183.

Johnson, C. C., & Czerniak, C. M. (2023). *Interdisciplinary approaches and integrated STEM in science teaching*. In *Handbook of Research on Science Education* (pp. 559–585). Routledge.

Kovács, A., Neyts, E. C., Cornet, I., Wijnants, M., & Billen, P. (2020). *Modeling the physicochemical properties of natural deep eutectic solvents*. *ChemSusChem, 13*(15), 3789–3804.

Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). *Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change*. *Science Education, 66*(2), 211–227.

Wakeman, R., & Tarleton, E. S. (2005). *Solid/Liquid Separation: Principles of Industrial Filtration*. Elsevier.

ИНТЕРДИСЦИПЛИНАРНИ STEM МЕТОДИ ЗА РАЗДЕЛЯНЕ НА СМЕСИ: ОТ ЛАБОРАТОРНИ ОПИТИ ДО ТЕХНОЛОГИИ ЗА ГЛОБАЛНО ПРЕЧИСТВАНЕ

Здравко Йорданов, Иванина Еленкова, Христина Димова

ОУ „ Св. св. Кирил и Методий“, гр. Дупница, 2600, България

РЕЗЮМЕ

Настоящият доклад разглежда възможностите за прилагане на интердисциплинарен STEM подход при изучаването на методите за разделяне на хетерогенни смеси чрез интегриране на знания от химията, физиката и екологичното инженерство. Проведени са лабораторни експерименти, включващи филтриране, утаяване и магнитно разделяне, с цел изследване на ефективността на различни филтрационни среди и анализ на основните физикохимични процеси. На базата на получените резултати е разработен концептуален модел на многостепенна филтрационна система, илюстриращ възможностите за приложение на изучаваните процеси при пречистване на води и управление на отпадъците. Получените резултати показват, че използването на STEM подхода подпомага формирането на практически умения, развива инженерно мислене и създава връзка между учебното съдържание и реални екологични проблеми.

КЛЮЧОВИ ДУМИ: *смеси, методи за разделяне, филтриране, STEM иновации, екология, магнитно разделяне*

INTERDISCIPLINARY STEM METHODS FOR MIXTURE SEPARATION: FROM LABORATORY EXPERIMENTS TO GLOBAL WATER TREATMENT TECHNOLOGIES

Zdravko Yordanov, Ivanina Elenkova, Hristina Dimova

Primary School “St. St. Cyril and Methodius”, Dupnitsa 2600, Bulgaria

ABSTRACT

This paper explores the application of an interdisciplinary STEM approach to teaching methods for separating heterogeneous mixtures through the integration of knowledge from chemistry, physics, and environmental engineering. Laboratory experiments involving filtration, sedimentation, and magnetic

separation were conducted to investigate the efficiency of different filtration media and to analyze the underlying physicochemical processes. Based on the experimental findings, a conceptual model of a multi-stage filtration system was developed to demonstrate the potential application of the studied separation methods in water treatment and waste management. The results indicate that the implementation of the STEM approach promotes the development of practical skills, enhances engineering thinking, and strengthens the connection between classroom learning and real-world environmental challenges.

KEYWORDS: mixtures; separation methods; filtration; STEM education; environmental education; magnetic separation

1. Въведение

В условията на нарастващи екологични предизвикателства, свързани със замърсяването на водните ресурси и ефективното управление на отпадъците, обучението по природни науки придобива все по-важна роля за формирането на научна грамотност и екологична култура у учениците. Съвременните образователни подходи насърчават интегрирането на знания от различни научни области и поставят акцент върху практическото приложение на усвоените знания чрез решаване на реални проблеми.

Интердисциплинарният STEM подход (Science, Technology, Engineering and Mathematics) създава възможности за свързване на химията, физиката, инженерните науки и технологиите в единна образователна среда (Johnson & Czerniak, 2023), Чрез експериментална дейност учениците не само усвояват основните принципи на методите за разделяне на смеси, но и развиват умения за наблюдение, анализ, работа в екип и решаване на практически задачи.

Методите за разделяне на хетерогенни смеси – филтриране, утаяване и магнитно разделяне – представляват основни физични процеси, намиращи широко приложение както в лабораторната практика, така и в различни отрасли на промишлеността, екологичното инженерство и рециклирането на отпадъци. Изучаването им в училищна среда предоставя възможност за осъществяване на връзка между учебното съдържание и реални приложения в науката и практиката.

Настоящият доклад представя възможностите за прилагане на интердисциплинарен STEM подход при изучаването на методите за разделяне на хетерогенни смеси чрез лабораторни експерименти, количествен анализ на резултатите и разработване на концептуални модели, свързани с екологични приложения. Изследването има за цел да покаже как практическата експериментална дейност може да подпомогне усвояването на научните знания и развитието на инженерно мислене у учениците.

За да придобие изследването необходимата академична дълбочина и ясно изразена структура, методологическата рамка на доклада се опира на следните научно-теоретични категории:

1.1. Обект на изследването: Процесът на обучение по природни науки в прогимназиалния етап на основното образование (в контекста на практическата дейност в ОУ „Св. св. Кирил и Методий“, гр. Дупница), базиран на иновативния и интердисциплинарен STEM подход.

1.2. Предмет на изследването: Дидактическите и научно-практическите аспекти на традиционните методи за разделяне на хетерогенни смеси (филтриране, утаяване, магнитно разделяне) и трансформацията им в концептуални модели за екологична защита.

1.3. Цел на доклада: Да се проектира, анализира и теоретично обоснове интердисциплинарен модел на тристепенна пречиствателна система и магнитен сепаратор, доказвайки че малките лабораторни експерименти, изпълнени в рамките на училищного STEM обучение, стоят в основата на глобалните макро-технологии за устойчиво развитие.

1.4. Задачи на изследването:

Анализ на теоретичните основи и физикохимичните параметри, обуславящи ефективността на процесите филтриране, гравитационно утаяване и магнитна сепарация.

Провеждане на контролирани лабораторни опити за извличане на сравнителни количествени данни относно капацитета на различни филтрационни среди (филтърна хартия, кварцов пясък, активен въглен).

Разработване на концептуален инженерно-технологичен дизайн на „умна“ екологична филтрираща колона и оценка на нейната теоретична приложимост в реална среда.

Оценка на ролята на проектно-базираното STEM обучение за изграждане на екологично съзнание, критично мислене и практически умения у учениците, подготвяйки ги за бъдещи изследователи и откриватели.

2. Методология и организация на изследването

Научно-методическата рамка на настоящото изследване е разработена в съответствие с принципите на проектно-базираното и интердисциплинарното STEM обучение. Основната цел е чрез лабораторни експерименти учениците да приложат знания за физикохимичните свойства на хетерогенните смеси и методите за тяхното разделяне, като същевременно развият умения за наблюдение, анализ и решаване на практически задачи.

2.1. Обект на педагогическото наблюдение и времеви обхват

В изследването взе участие фокусна група от 23 ученици от 5. клас под научно-методическото ръководство на преподавател по природни науки. Проектът беше реализиран на няколко

последователни етапа в рамките на учебната година, завършвайки с обобщаване на резултатите за представяне на научната конференция „Творчески умове на бъдещето“ 2026. Изборът на ученици от V клас е обусловен от необходимостта за ранно формиране на функционална научна грамотност, екологично мислене и умения за работа чрез практически експерименти.

2.2. Методи на изследването

За постигане на поставените задачи и верификация на резултатите беше приложен мултидисциплинарен комплекс от изследователски методи:

- **Теоретичен и сравнителен анализ:** Проучване и анализ на специализирана литература, свързана с методите за разделяне на смеси, адсорбционните процеси и приложението им в екологичните технологии.
- **Лабораторен експеримент (Моделиране):** Провеждане на контролирани експерименти с моделни хетерогенни смеси с цел оценка на ефективността на различни методи за разделяне.
- **Емпирично наблюдение и дигитална микроскопия:** Наблюдение и качествен анализ на промените в състава на моделните смеси преди и след приложените методи за разделяне.
- **STEM моделиране:** Разработване на концептуални модели, демонстриращи възможностите за приложение на изучаваните процеси при пречистване на води.
- **Количествен анализ:** Определяне на времето за филтриране, скоростта на процеса и ефективността на различните филтрационни среди чрез количествена обработка на експерименталните данни.

2.3. Организационна структура и етапи на изследването

Изследователският процес е организиран в четири последователни и взаимно свързани етапа:

Теоретично планиране и концептуализация (Подготвителна фаза): Дефиниране на научния апарат на изследването. Учениците бяха запознати с физичните и химичните свойства на смесите. Проведе се дискусия върху глобалния проблем с недостига на питейна вода и натрупването на пластмасови отпадъци в океаните.

Експериментално-лабораторна дейност (Практическа фаза): Провеждане на контролирани опити в лабораторна среда. Учениците изследваха процесите на филтриране, гравитационното утаяване на системи с различна плътност и магнитното сепариране на дисперсни железни частици от немагнитна среда. На този етап бяха заснети и експерименталните постановки (Фиг. 1, Фиг. 2 и Фиг. 3).

Инженерен STEM дизайн и иновации (Концептуална фаза): Трансформиране на стандартното лабораторно филтриране в концептуален дизайн на „умни“ филтриращи системи, използващи нано-мембрани и активен въглен. Процесът беше организиран като симулация на реално екологично инженерство за отстраняване на микро-замърсители и тежки метали.

Анализ, обработка и оформяне на изводите (Заключителна фаза): Систематизиране на събраните емпирични данни, математическо изчисление на ефективността, добавяне на актуална научна литература и оформяне на крайния текст на доклада.

3. Традиционни методи за разделяне и техните физикохимични свойства

Разделянето на хетерогенни смеси се основава на различията във физичните свойства на техните компоненти, като размер на частиците, плътност, магнитни свойства и други характеристики. В зависимост от природата на сместа се прилагат различни методи за разделяне, които намират широко приложение както в лабораторната практика, така и в промишлеността и екологичните технологии.

3.1. Филтриране: Използва се за отделяне на диспергирани твърди вещества от течна среда въз основа на разликата в размерите на частиците и порите на филтрационната преграда (например пясък и вода) (Wakeman & Tarleton, 2005).



Фигура 1 - Лабораторна система за гравитационно филтриране *(Източник: Личен архив на авторите)*

3.2. Утаяване (Седиментация): Процес, при който дисперсната фаза с по-голяма плътност се отлага на дъното на съда под въздействието на гравитационните сили, разделяйки се от по-леката течна (Ungarish, 2013).



Фигура 2 - Експериментално изследване на процеса гравитационно утаяване *(Източник: Личен архив на авторите)*

3.3. Магнитно разделяне: Магнитното разделяне е физичен метод за отделяне на вещества, който се основава на различната магнитна възприемчивост на компонентите в сместа (Jakubski et al., 2023). Чрез използване на постоянен магнит или електромагнит могат ефективно да бъдат отделени феромагнитни материали, като железни частици, от немагнитни вещества. Методът намира широко приложение в рециклирането на отпадъци, обогатяването на полезни изкопаеми и различни индустриални процеси за сепариране на материали.

3.4.

4. Резултати от практически експерименти и анализ

В рамките на изследването беше проведен количествен лабораторен експеримент за оценка на пречистващата ефективност на различни филтрационни среди при обработката на моделна хетерогенна смес, състояща се от водна суспензия на фини почвени частици и органични оцветители. Всички експерименти бяха извършени при еднакви условия с фиксиран обем на пробата от 100 ml, което осигури възможност за сравнителен анализ на изследваните филтрационни материали. Получените експериментални резултати са представени в **Таблица 1.**

Таблица 1 - Ефективност на филтрационните материали при пречистване на моделна смес.

Експериментален филтрационен слой	Средно време за филтрация на 100 mL(s)	Изчислена скорост на филтрация (mL/s)	Ефективност на задържане на замърсителите (%)
Обикновена филтърна хартия	45 s	2.22 mL/s	82.0%
Филтърна колона с кварцов пясък	90 s	1.11 mL/s	89.5%
Композитен слой с активен въглен	150 s	0.67 mL/s	97.8%

Интерпретация на резултатите: Анализът на резултатите показва ясно изразена зависимост между структурата на използваната филтрационна среда и нейната пречистваща способност. Филтърната хартия осигурява най-висока скорост на филтрация, но задържа предимно по-едрите механични частици. Използването на кварцов пясък води до по-ниска скорост на филтрация и по-добро отделяне на суспендираните замърсители. Най-висока ефективност е отчетена при композитния слой с активен въглен, което може да се обясни с развитата му пореста структура и високата адсорбционна способност спрямо фини частици и органични вещества. Получените резултати потвърждават значението на избора на подходящ филтрационен материал в зависимост от поставената практическа задача.

Инженерни STEM решения и тяхната приложимост в реална среда

Преходът от фундаменталните лабораторни изпитвания към реалните индустриални и екологични технологии съставлява ядрото на приложния STEM подход (Salah et al., 2025). В тази секция предложените от ученическия изследователски екип експериментални модели се надграждат чрез концептуално инженерно проектиране, анализирайки тяхната мащабируемост, икономическа ефективност и реална приложимост в съвременната екологична практика.

5. Концептуални STEM решения и приложения

Получените експериментални резултати позволяват да бъдат предложени концептуални инженерни решения, основани на изучаваните методи за разделяне на смеси. Представените модели имат образователен характер и демонстрират възможностите за прилагане на придобитите знания

при разработване на идеи, свързани с опазването на околната среда и устойчивото използване на природните ресурси.

5.1. Концептуален модел на „умна“ екологична филтрация

Предложеният концептуален модел включва многостепенна филтрационна система, състояща се от кварцов пясък, чакъл и активен въглен, комбинирана със сензор за измерване на качеството на водата. Основната цел е демонстриране на възможностите за интегриране на природонаучни знания с инженерно проектиране и съвременни технологични средства в STEM обучението. Подобен модел може успешно да се използва като демонстрационна система в учебния процес за илюстриране на основните принципи на водопречистването.

5.2. Магнитно разделяне в кръговата икономика

Вторият концептуален модел представя възможностите за използване на магнитното разделяне при сортиране и рециклиране на отпадъчни материали. Чрез отделяне на феромагнитните компоненти се улеснява последващата обработка на отпадъците и се повишава ефективността на процесите по рециклиране. Представянето на подобни примери в учебната среда подпомага разбирането на връзката между изучаваните физични процеси и реалните технологии, използвани в съвременната индустрия и кръговата икономика.



Фигура 3 - Магнитно разделяне на дисперсни магнитни частици (железни стърготини) *(Източник: Личен архив на авторите)*

Тази технология е критично важна за автоматизираното извличане на ценни метали от битови отпадъци, намалявайки екологичния отпечатък и подпомагайки прехода към устойчива кръгова икономика.

6. Заключение

Настоящото изследване демонстрира възможностите за успешно интегриране на лабораторните експерименти с интердисциплинарния STEM подход при изучаването на методите за разделяне на хетерогенни смеси. Проведените практически дейности позволяват не само усвояване на основните физикохимични принципи на филтрирането, утаяването и магнитното разделяне, но и формиране на умения за наблюдение, анализ, интерпретация на резултатите и решаване на практически задачи.

Получените експериментални резултати показват различия в ефективността на използваните методи за разделяне и потвърждават значението на правилния избор на филтрационна среда в зависимост от поставената задача. Разработените концептуални модели разширяват възможностите за приложение на изучаваните процеси в образователен контекст и насърчават инженерното мислене, екологичната култура и работата по реални проблеми.

Предложеният модел на обучение може успешно да бъде адаптиран и към други теми от природните науки, като съдейства за повишаване на мотивацията на учениците и за развитието на ключови компетентности, свързани с научното изследване, критичното мислене и устойчивото развитие.

Използвана литература:

Jakubski, Ł., Dudek, G., & Turczyn, R. (2023). Applicability of composite magnetic membranes in separation processes of gaseous and liquid mixtures—a review. *Membranes, 13*(4), 384.

Johnson, C. C., & Czerniak, C. M. (2023). Interdisciplinary approaches and integrated STEM in science teaching. In *Handbook of Research on Science Education* (pp. 559–585). Routledge.

Salah, M., Al Ghazo, A., & Ahmad, S. (2025, March). Development of a Custom-Made Industrial Laboratory Test Bench for Motor Drive Systems: A Bridge Between STEM Education and Industry Applications. In *2025 IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC)* (pp. 1–7). IEEE.

Ungarish, M. (2013). *Hydrodynamics of Suspensions: Fundamentals of Centrifugal and Gravity Separation*. Springer Science & Business Media.

Wakeman, R., & Tarleton, E. S. (2005). Solid/Liquid Separation: Principles of Industrial Filtration. Elsevier.

ЗАМЪРСЯВАНЕ НА ВЪЗДУХА: ИНТЕРДИСЦИПЛИНАРЕН ПОДХОД И STEM ИНОВАЦИИ

Алекса Везенкова, Ивет Стоилова, Христина Димова

ОУ „ Св. св. Кирил и Методий“, гр. Дупница, 2600, България

РЕЗЮМЕ

Замърсяването на атмосферния въздух представлява значим екологичен и здравен проблем, който оказва неблагоприятно въздействие върху качеството на живот и общественото здраве. Настоящата разработка разглежда основните източници на замърсяване на въздуха, характеристиките на най-разпространените атмосферни замърсители и тяхното влияние върху дихателната система, с акцент върху бронхиалната астма при деца и ученици. Анализирана е ролята на климатични фактори, като температурните инверсии, за задържането на замърсители в приземния атмосферен слой и повишаването на риска за населението в градските котловинни райони.

В изследването е предложен концептуален STEM модел за мобилен мониторинг на качеството на въздуха, базиран на IoT технологии и преносими сензори за измерване на фини прахови частици. Разгледани са възможностите за използване на събраните данни за ранно предупреждение и подпомагане на ученици с респираторни заболявания при ежедневното им придвижване в градска среда. Резултатите показват потенциала на съвременните дигитални технологии за подобряване на екологичния мониторинг, повишаване на информираността и насърчаване на превантивни мерки за опазване на здравето.

КЛЮЧОВИ ДУМИ: замърсяване на въздуха, бронхиална астма, фини прахови частици, STEM технологии, IoT, екологичен мониторинг

AIR POLLUTION: AN INTERDISCIPLINARY APPROACH AND STEM INNOVATIONS

Alexa Vezenkova, Ivet Stoilova, Hristina Dimova

Primary School “St. St. Cyril and Methodius”, Dupnitsa 2600, Bulgaria

ABSTRACT

Air pollution is one of the most significant environmental and public health challenges of modern society, exerting substantial adverse effects on quality of life and human health. This study examines the

principal sources of air pollution, the characteristics of the most common atmospheric pollutants, and their impact on human health, with particular emphasis on the development and exacerbation of bronchial asthma in children and school-aged students. The role of climatic factors, including temperature inversions, in trapping pollutants within the lower atmospheric layer and increasing health risks for populations living in urban basin regions is also analyzed.

The study proposes a conceptual STEM model for mobile air quality monitoring based on Internet of Things (IoT) technologies and portable sensors for measuring particulate matter (PM) concentrations. The potential application of the collected data for early warning systems and for supporting students with respiratory diseases during their daily mobility in urban environments is discussed. The findings demonstrate the potential of modern digital technologies to enhance environmental monitoring, increase public awareness, and promote preventive health protection measures through the integration of science, engineering, and information technologies.

KEYWORDS: air pollution; particulate matter (PM); bronchial asthma; STEM education; Internet of Things (IoT); environmental monitoring.

1. Въведение

Замърсяването на атмосферния въздух е сред най-сериозните екологични предизвикателства на съвременното общество. Нарастващата урбанизация, индустриалната дейност и интензивният автомобилен транспорт водят до повишени концентрации на вредни вещества в атмосферата, които оказват неблагоприятно въздействие върху околната среда и човешкото здраве. Особено уязвими към тези въздействия са децата и хората с хронични респираторни заболявания.

Според данни на Световната здравна организация замърсеният въздух е сред водещите рискови фактори за развитието на заболявания на дихателната и сърдечно-съдовата система (Draganova, 2025). В градските райони проблемът често се задълбочава от специфични географски и климатични особености. В населените места, разположени в котловинни релефни форми, се наблюдават условия за задържане на замърсителите в приземния атмосферен слой, особено през студените месеци на годината.

Съществена роля за това явление играят температурните инверсии. При тях по-топъл въздушен слой се разполага над по-студения въздух в близост до земната повърхност, което затруднява вертикалното смесване на въздушните маси. В резултат на това замърсителите се натрупват в ниските слоеве на атмосферата и могат да достигнат концентрации, представляващи риск за здравето на населението (Велев, 2015).

Традиционните станции за мониторинг на качеството на въздуха предоставят ценна информация за общото състояние на атмосферната среда, но често не отразяват локалните различия в нивата на замърсяване. В рамките на един и същи град могат да съществуват зони с различна концентрация на замърсители в зависимост от интензивността на трафика, вида на отоплението и особеностите на градската среда. Това създава необходимост от по-гъвкави подходи за наблюдение на качеството на въздуха в реално време.

Настоящата разработка разглежда проблема чрез интердисциплинарен подход, който обединява знания от областта на екологията, медицината и STEM технологиите. Анализирани са основните източници на замърсяване на въздуха, влиянието им върху здравето на учениците и възможностите за приложение на IoT технологии при мобилния мониторинг на атмосферната среда. Предложен е концептуален модел на система за ранно предупреждение, базирана на преносими сензори и мобилно приложение, която може да подпомогне информирания избор на по-безопасни маршрути за придвижване в градска среда.

2. Основни източници и замърсители на въздуха

Основните източници на замърсяване на въздуха могат да бъдат разделени на естествени и антропогенни (причинени от човека) (Александров, 2020).

2.1. Замърсители

Основните източници на замърсяване на атмосферния въздух могат да бъдат класифицирани като антропогенни и естествени. Сред антропогенните източници най-съществен принос имат транспортният сектор, промишлените предприятия, битовото отопление и селскостопанските дейности. Автомобилният транспорт отделя значителни количества азотни оксиди, въглероден оксид и фини прахови частици вследствие на изгарянето на горива. Промишлеността и енергетиката са източници на серен диоксид, прахови частици и различни химични съединения, които оказват неблагоприятно въздействие върху околната среда и човешкото здраве. Битовото отопление с твърди горива, особено през зимния период, допринася за повишаване на концентрациите на фини прахови частици в населените места. Селскостопанските дейности също участват в замърсяването чрез отделянето на метан и амоняк.

Към естествените източници на замърсяване се отнасят горските пожари, вулканичните изригвания, прашните бури и биологичните аерозоли, включително полените. Макар техният принос обикновено да е по-труден за контролиране, при определени условия те могат значително да влошат качеството на атмосферния въздух и да повлияят неблагоприятно върху здравето на населението.

2.2. Основни замърсители на въздуха

- Въглероден оксид (CO) – Безцветен и без мирис газ. Получава се при непълно изгаряне на горива. Токсичен за хората и животните

- Въглероден диоксид (CO_2) – Основен парников газ. Допринася за изменението на климата

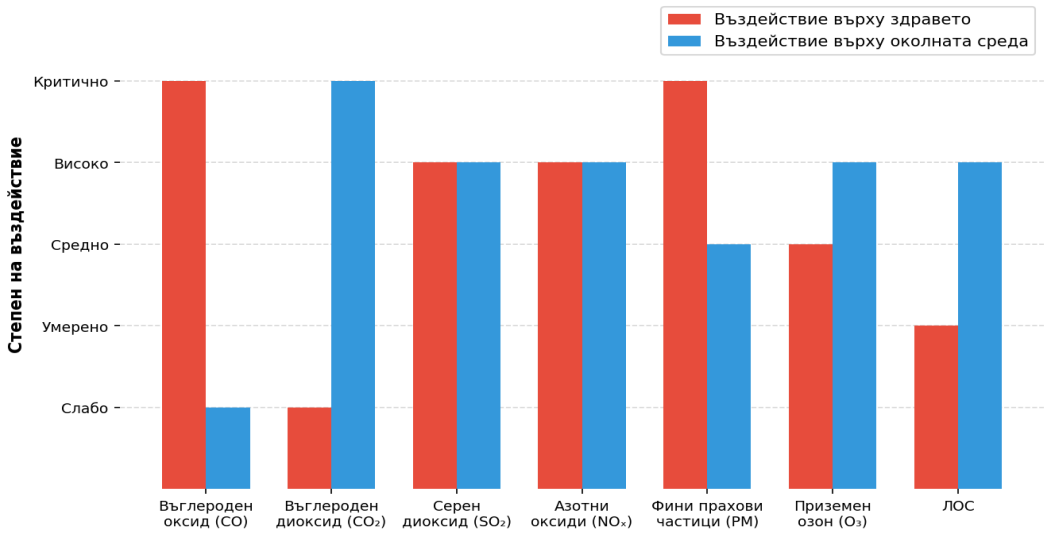
- Серен диоксид (SO_2) – Образува се при изгаряне на въглища и нефт. Причинява киселинни дъждове

- Азотни оксиди (NO_x) – Отделят се от двигатели и индустрия. Участват в образуването на смог и киселинни дъждове.

- Фини прахови частици (PM10 и PM2.5) – Много малки частици прах и сажди. Навлизат дълбоко в белите дробове и са опасни за здравето.

- Озон (O_3) в приземния слой – Образува се при химични реакции между замърсители под действието на слънчева светлина. Дразни дихателната система.

- Летливи органични съединения – изпаряват се от горива, разтворители и бои. Допринасят за образуването на смог.



Фигура 1 - Сравнителна оценка на въздействието на основните атмосферни замърсители върху човешкото здраве и околната среда.

3. Влияние на замърсяването върху човешкото здраве

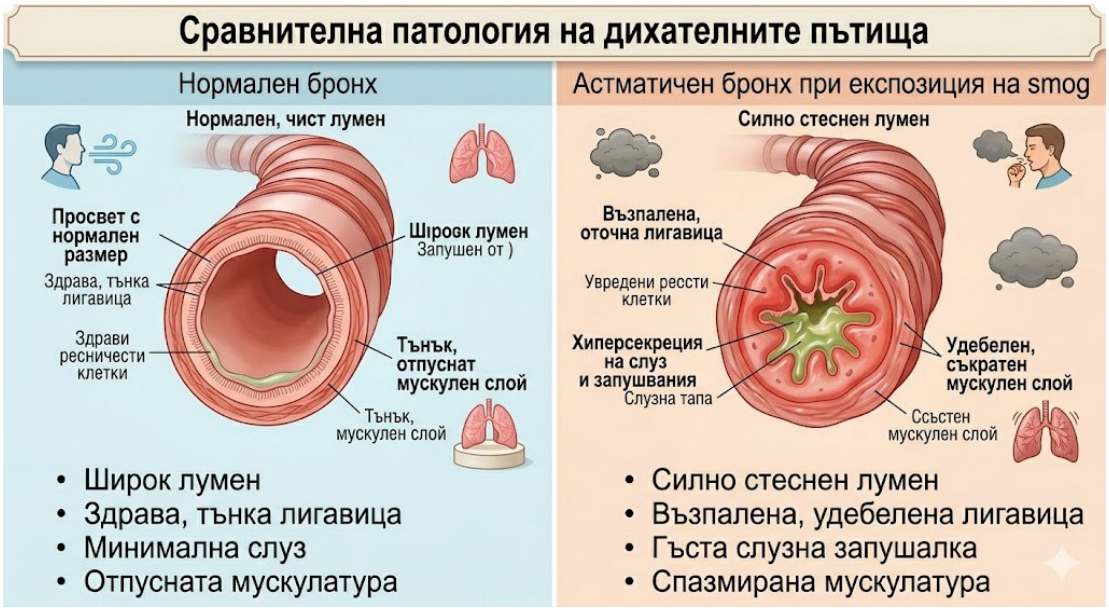
Медицински аспекти: Патогенеза на бронхиалната астма под влияние на замърсителите

Връзката между екологичните параметри и човешкото здраве е най-силно изразена при уязвимите групи (деца и ученици), чиято дихателна система е в процес на развитие и притежава по-висока минутна вентилация спрямо телесното тегло (Проданов, 2011).

Механизъм на увреждане на клетъчно ниво

Когато финитe прахови частици (особено ФПЧ2.5) и токсичните газове бъдат вдишани, те заобикалят филтриращите механизми на носоглътката и проникват в лумена на бронхиалното дърво. Физическият контакт на частиците с реснителния епител на дихателните пътища предизвиква механично и химично дразнене. Това отключва каскада от патофизиологични реакции (Цветкова & Минков, 2017).

1. **Оксидативен стрес:** Свободните радикали, пренасяни по повърхността на ФПЧ, увреждат клетъчните мембрани на епителните клетки.
2. **Имунен отговор:** Отключва се синтез на провъзпалителни медиатори (цитокини хистамин) от мастоцитите и еозинофилите в белодробната тъкан (Белемезова, 2022).
3. **Лигавичен оток и хиперсекреция:** В отговор на възпалението, жлезите започват да отделят прекомерно количество гъст бронхиален секрет (слуз), който запушва малките дихателни пътища.



Фигура 2 - Сравнение между нормален и астматичен бронх при експозиция на атмосферни замърсители.

(Източник: Медицински атлас по респираторни заболявания/Личен архив) – Графиката ясно илюстрира разликата между:

Нормален бронх: Широк лумен, тънка и спокойна лигавица, липса на излишна слуз, отпусната гладка мускулатура.

Астматичен бронх при експозиция на смог: Силно стеснен лумен, удебелена и оточна (възпалена) лигавица, хиперсекреция на слуз, блокираща въздушния поток и силно съкратени (спазмирани) мускулни влакна (Петров, 2024).

Този патологичен статус клинично се проявява с пристъпи на задух (диспнея), мъчителна кашлица свирещи хрипове, което налага спешна инхалаторна терапия и доказва критичната нужда от превенция и избягване на замърсената среда.

3.1. Въздействие върху дихателната система

Клинична картина и бронхоспазъм

При пациенти с диагностицирана астма, този процес води до **бронхиална хиперреактивност**. Гладките мускули около бронхите се съкращават спазматично (бронхоспазъм), стеснявайки драстично просвета за преминаване на въздушния поток.

3.2. Механизъм за развитие на астма

- **Дефиниция:** Бронхиалната астма е хронично имуно0 възпалително заболяване на дихателните пътища, характеризиращо се с вариабилна въздушна обструкция.
- **Клинична картина:** Проявява се чрез бронхиална хиперреактивност, ексцесивен оток на мукозата и остър бронхоспазъм, водещи до епизоди на задух, хрипове и мъчителна кашлица.

Ежедневните маршрути на учениците до учебните заведения често пресичат нерегистрирани зони с пикови стойности на трафик. Вдишването на аерозолни полютанти действа като директен биохимичен тригер, който индуцира оксидативен стрес в дихателния лумен, увреждa ресничестия епител и отключва остри, потенциално животозастрашаващи астматични пристъпи.

4. Методология

Настоящото изследване се основава на интердисциплинарен подход, който съчетава знания от областта на екологията, медицината и STEM технологиите. За постигане на поставените цели са приложени следните методи:

4.1. Теоретичен и сравнителен анализ

Извършен е преглед на научна литература, публикации на международни организации и специализирани източници, свързани със замърсяването на атмосферния въздух, основните замърсители и тяхното въздействие върху човешкото здраве. Анализирани са данни и препоръки на Световната здравна организация и Европейската агенция по околна среда относно качеството на атмосферния въздух.

4.2. Интердисциплинарен екологично-медицински анализ

Проучени са характеристиките на основните атмосферни замърсители, включително фини прахови частици, азотни оксиди, серен диоксид и въглероден диоксид, както и тяхното влияние върху дихателната система. Разгледани са механизмите, чрез които замърсителите могат да предизвикат или да влошат респираторни заболявания, с акцент върху бронхиалната астма при деца и ученици.

4.3. Анализ на факторите на градската среда

Изследвана е ролята на транспортния трафик, битовото отопление и климатичните особености на котловинните райони като предпоставки за натрупване на замърсители в приземния атмосферен слой. Специално внимание е отделено на влиянието на температурните инверсии върху качеството на въздуха.

4.4. Концептуално STEM моделиране

Разработен е концептуален модел на система за мобилен мониторинг на качеството на въздуха, базирана на IoT технологии, преносими сензори и мобилно приложение. Моделът включва описание на основните хардуерни компоненти, начина на събиране и обработка на данните, както и възможностите за генериране на предупреждения при установяване на повишени концентрации на фини прахови частици.

4.5. Симулативен анализ

За илюстриране на приложението на предложената система са използвани примерни данни, чрез които е демонстриран начинът на работа на модела при различни нива на замърсяване в градска среда. Получените резултати имат илюстративен характер и служат за оценка на потенциалните възможности на предложеното решение.

5. STEM иновации за мониторинг за качеството на въздуха: смарт мониторинг

5.1. Хардуерна архитектура

За да се транслира теоретичният анализ в практическо и приложно дигитално решение, настоящото изследване разработва иновативна концепция за персонална здравна превенция: **Носена IoT (Internet of Things) сензорна система за ученици**. Моделът излиза извън рамките на конвенционалните статични измервания, като поставя фокус върху динамичното проследяване на въздушната среда в непосредствения микрослой, в който децата дишат по време на ежедневния си маршрут до училище.

Проектирано преносимо устройство е конфигурирано като компактен модул, предназначен за външно закрепване към ученическа раница. Хардуерната спецификация включва следните основни компоненти:

1. **Микроконтролер (Централен процесор) :** Използва се високоенергийно ефективен чип (напр.ESP32 или NodeMCU), оборудван с вградени Wi-Fi и Bluetooth Low Energy (BLE) модули за безжична комуникация.
2. **Сензор за фини прахови частици:** Лазерен сензор от тип *SDS011* (или сходен микромодел), работещ на принципа на лазерната дифракция (Laser Scattering Method). Той позволява селективно и високоточно измерване на концентрацията на ФПЧ2.5 и ФПЧ10 в реално време.
3. **Захранващ блок:** Автономна литиево- йонна преносима батерия (Power Bank), осигуряваща непрекъсната работа на устройството в рамките на деня.

5.2. Софтуерна архитектура и логически алгоритъм

Събраните от сензора данни се предават периодично (на всеки 30 секунди) чрез BLE протокол към персоналния смартфон на ученика. Специално разработено за целта мобилно приложение обработва входящия поток от данни и изпълнява следния алгоритмичен цикъл:

- **Фаза 1: Геолокализация.** Приложението синхронизира данните за ФПЧ с текущите GPS координати на ученика в реално време.
- **Фаза 2: Сравнителен анализ.** Софтуерът съпоставя измерената стойност с предварително заложени критични прагове на безопасност за пациенти с респираторни заболявания.
- **Фаза 3: Ранно предупреждение и маршрутизация.** При засичане на наднормено замърсяване, системата генерира моментално известие (Push Notification) и преизчислява маршрута на движение, насочвайки ученика към алтернативни, по-чисти улици.

6. Екологичен мониторинг и антропогенни източници в градска среда

Анализът за качеството на атмосферния въздух изисква детайлно идентифициране на източниците на емисии, които захранват градския смог. В контекста на град Дупница и прилежащия регион, антропогенния натиск върху атмосферата се формира основно от два стълба: битовото отопление през зимата и интензивността на автомобилния трафик.

6.1. Битово отопление и изгаряне на твърди горива

През есенно- зимния период основен източник на неорганизирани емисии на ФПЧ10, ФПЧ2.5 и серен диоксид (SO_2) е масовото използване на нискокачествени въглища и дърва за огрев в частния сектор. Процесът на изгаряне в малките домашни горивни инсталации често протича при неоптимален кислороден режим, което води до непълно изгаряне и отделяне на огромни количества

сажди, въглероден оксид (CO) и полициклични ароматни въглеводороди. Поради липсата на пречиствателни филтри на домашните комини, тези емисии се отделят директно в приземния атмосферен слой.

6.2. **Транспортен сектор и автомобилни емисии**

Транспортният трафик в близост до урбанизираните зони и училищните райони е постоянен източник на замърсяване през цялата година. Автомобилите с дизелови и бензинови двигатели с вътрешно горене емитират значителни обемни азотни оксиди и летливи органични съединения, които под въздействието на слънчевата радиация могат да образуват вторични замърсители като тропосферен озон. Допълнителен фактор е механичното разпрашаване от износването на спирачните апарати и гумите, което директно увеличава концентрацията на едрите прахови частици (ФПЧ10) по протежение на пътните артерии.

7. Дискусия

Интердисциплинарният подход, приложен в настоящото изследване, позволява проблемът със замърсяването на атмосферния въздух да бъде разгледан както от екологична, така и от здравна и технологична гледна точка. Анализът показва, че качеството на въздуха в градска среда е резултат от взаимодействието между множество фактори, включително транспортен трафик, битово отопление, климатични особености и пространствено разпределение на източниците на замърсяване.

7.1. Интерпретация на резултатите и регионални особености

Районите, разположени в котловинни релефни форми, са по-податливи на натрупване на атмосферни замърсители, особено през зимния сезон. Температурните инверсии могат да ограничат вертикалното смесване на въздушните маси и да създадат условия за повишаване на концентрацията на фини прахови частици в приземния атмосферен слой. Това увеличава риска за чувствителни групи от населението, включително ученици с респираторни заболявания.

Представените примерни данни показват различия в нивата на експозиция в зависимост от местоположението. Най-високи стойности са отчетени в близост до интензивен автомобилен трафик, докато парковите пространства демонстрират значително по-ниски нива на замърсяване. Тези резултати потвърждават необходимостта от по-детайлно локално наблюдение на качеството на въздуха.

7.2. Предимства и приложимост на предложеното STEM решение

Предложеният концептуален модел демонстрира възможностите на съвременните IoT технологии за събиране и обработка на екологични данни в реално време. Използването на

преносими сензори би могло да осигури по-точна информация за индивидуалната експозиция на замърсители в сравнение със стационарните измервателни станции.

Допълнително предимство на системата е възможността за интегриране на геолокационни данни и автоматизирани предупреждения при установяване на повишени нива на замърсяване. Подобен подход може да подпомогне информираното вземане на решения и да насърчи превантивно поведение сред учениците и техните семейства.

7.3. Ограничения и бъдещи насоки за развитие

Настоящото изследване има концептуален характер и не включва дългосрочни теренни измервания с реални устройства. Поради това представените резултати следва да се разглеждат като илюстрация на потенциалните възможности на предложеното решение.

В бъдеще моделът може да бъде разширен чрез изграждане на мрежа от свързани мобилни сензори, които да предоставят информация за качеството на въздуха в реално време. Натрупването на по-голям обем данни би позволило създаването на динамични карти на замърсяването и по-прецизна оценка на рисковете в различни части на градската среда.

8. Заключение

Замърсяването на атмосферния въздух продължава да бъде сред най-съществените екологични фактори, оказващи влияние върху човешкото здраве. Анализът на основните източници на замърсяване и на въздействието на атмосферните замърсители върху дихателната система показва необходимостта от прилагане на ефективни средства за мониторинг и превенция, особено при уязвими групи от населението.

В рамките на настоящото изследване беше разработен концептуален STEM модел за мобилен мониторинг на качеството на въздуха, базиран на IoT технологии, преносими сензори и мобилно приложение. Предложеният подход демонстрира възможностите за събиране на локални данни в реално време и за предоставяне на навременна информация относно потенциални рискове, свързани с повишени концентрации на фини прахови частици.

Получените резултати показват, че съчетаването на екологични знания, медицински аспекти и съвременни дигитални технологии може да подпомогне развитието на иновативни решения за опазване на общественото здраве. Въпреки концептуалния характер на разработката, предложеният модел разкрива перспективи за бъдещо практическо приложение и надграждане чрез реални измервания и разширяване на мрежата за мониторинг.

Разработването на подобни STEM решения има потенциал не само да подобри информираността относно качеството на атмосферния въздух, но и да насърчи активното участие на учениците в процесите, свързани с опазването на околната среда и устойчивото развитие.

Използвана литература:

Александров, В. (2020). Климатични промени в миналото и сега, причини и сценарии, влияние и уязвимост. In BOOK OF PROCEEDINGS (Vol. 2, p. 70).

Белемезова, К. П. (2022). Мезенхимни стволови клетки и ролята им в имунорегулацията (Doctoral dissertation, Medical University of Sofia (Bulgaria)).

Велев, С. (2015). Екологична сигурност. Военна академия „Г. С. Раковски“, София.

Draganova, P. (2025). Ефектите от замърсяването на околната среда върху човешкото здраве. In Сборник доклади от научна конференция „Знание, наука, иновации, технологии” (Vol. 1, No. 2, pp. 370–384). Институт за знание, наука и иновации ЕООД.

Петров, М. (2024). Особености на терапевтичните мерки за професионалната астма. Management & Education/Upravlenie i Obrazovanie, 20(6).

Проданов, Г. (2011). Хигиена и здравно образование. Пловдив.

Цветкова, С., & Минков, Т. (2017). Анализ и оценка на вредното въздействие на транспорта върху околната среда в градовете. Икономически и социални алтернативи, (3).

НАУКАТА ПАЗИ ПРИРОДАТА: ОТ ЗАМЪРСЯВАНЕТО ДО РЕШЕНИЕТО

Борислав Брусарски, Ивайла Григорова, Нася Борисова, Максимилиана Чаван-Рок, Цветелина Пенева, Мариана Стамболийска

ОУ „Проф. Марин Дринов“, гр. Кюстендил, България

РЕЗЮМЕ

Докладът разглежда ролята на съвременната наука в справянето с глобалното замърсяване чрез методите на зелената химия и иновациите в роботиката. Анализират се процесите на киселинни дъждове, пречистването на води чрез адсорбция и предизвикателствата, свързани с микропластмасата. Специално внимание е отделено на интеграцията на изкуствен интелект и автономни системи за управление на опасни отпадъци като ключов фактор за постигане на „Нулево замърсяване“.

КЛЮЧОВИ ДУМИ: зелена химия, неутрализация, адсорбция, биоплимери, роботизация, изкуствен интелект.

Science Protects Nature: From Pollution to Solution

Borislav Brusarski, Ivayla Grigorowa, Nasya Borisova, Maximiliana Chavan-Rock, Tsvetelina Peneva, Mariana Stamboliyska

Primary School “Prof. Marin Drinov”, Kyustendil, Bulgaria

ABSTRACT

This report examines the role of modern science in addressing global pollution through green chemistry methods and innovations in robotics. It analyzes the processes of acid rain, water purification by adsorption and the challenges associated with microplastics. Special attention is paid to the integration of artificial intelligence and autonomous systems for hazardous waste management as a key factor in achieving “Zero Pollution”.

KEYWORDS: green chemistry, neutralization, adsorption, biopolymers, robotics, artificial intelligence.

1. Въведение

В съвременния свят науката е основният инструмент за промяна на бъдещето на планетата. Глобалното замърсяване е комплексно предизвикателство, което изисква радикално преминаване към принципите на „Зелената химия“ (Green Chemistry) и устойчивото развитие (Anastas & Warner, 2000). Голяма част от антропогенните замърсители остават скрити на молекулно ниво под формата на разтворими токсични вещества, микрочастици и устойчиви органични съединения. Химическата наука ни помага не само да идентифицираме тези невидими заплахи, но и да разработим ефективни методи за тяхното неутрализиране и улавяне.

1.1. Цел на разработката

Основната цел на настоящата разработка е да се анализира синергичното действие между съвременните екологични химични методи и автономните технологични системи (роботика и AI) като интегриран подход за мониторинг, превенция и ликвидиране на последиците от глобалното замърсяване.

1.2. Методология на изследването

За постигане на поставената цел и за осигуряване на висока степен на научно-приложна достоверност на резултатите, в настоящата разработка е реализирана комплексна интердисциплинарна методология. Тя интегрира класически изследователски подходи от екологичната химия с модерни инженерни методи за системен анализ на изкуствен интелект и автономни хардуерни комплекси. Изследователската архитектура е структурирана в три фундаментални направления:

1.2.1. **Сравнителен и критичен литературен анализ на съвременните научни публикации в областта на зелената химия и екологичното инженерство** (Anastas & Warner, 2000; Gross & Kalra, 2002).

Първото методологическо направление е базирано на систематичен и критичен макроанализ на референтната научна литература в глобален мащаб. Теоретичната рамка на изследването стъпва върху фундаменталните принципи на „Зелената химия“ (Green Chemistry), формулирани от Анастас и Уорнър (Anastas & Warner, 2000). Анализът е насочен към извличане на ключови закономерности, свързани с проектирането на химични процеси и продукти, които намаляват или изцяло елиминират генерирането на опасни вещества още на етапа на тяхното планиране. Специално внимание се отделя на концепциите за енергийна ефективност, атомен ефективност и използването на възобновяеми суровини като алтернатива на изкопаемите ресурси.

В контекста на екологичното инженерство и кризата с глобалното замърсяване, анализът е надграден чрез критичен преглед на изследванията на Грос и Калра (Gross & Kalra, 2002) относно синтеза, структурата и деградационния потенциал на биоразградимите полимери в естествена среда. Проучен е научният напредък в прехода от конвенционални полимери на нефтена основа към алифатни полиестери и полихидроксиалканоати. Литературният одит обхваща процесите на биодеградация под въздействието на микроорганизми (бактерии и гъби) и кинетиката на разпадане на материалите до нетоксични крайни продукти като въглероден диоксид, вода и биомаса. Чрез този сравнителен метод се идентифицират технологичните дефицити в сегашните производствени цикли и се дефинират критичните точки, в които иновациите в материалознанието могат директно да решат проблемите с натрупването на микропластмаса.

1.2.2. **Концептуално моделиране на процесите на неутрализация и адсорбция при пречистването на води и почви** (Seinfeld & Pandis, 2016).

Второто методологическо направление преминава от теоретичен анализ към приложно концептуално моделиране на физикохимичните взаимодействия, протичащи в замърсена среда. Моделирането на атмосферните замърсявания и последващото им въздействие върху хидросферата и литосферата се базира на кинетичните и термодинамичните принципи, развити от Сайнфелд и Пандис (Seinfeld & Pandis, 2016). Концептуалният модел описва механизмите на хетерогенен масопренос и каталитично окисление на серния диоксид (SO_2) и азотните оксиди (NO_x) в атмосферните капки вода, водещи до формирането на киселинни дъждове. Математически се съобразяват промените в нивата на pH и се моделира стехиометрията на процесите на неутрализация чрез хетерогенни реакции в твърда и течна фаза при въвеждане на алкални агенти (калциев карбонат). Това позволява да се предвиди динамиката на възстановяване на нарушените биотопи.

Паралелно с това, за моделиране на процесите на дълбоко пречистване на промишлени и битови отпадни води, методологията използва фундаменталните принципи на адсорбцията и динамиката на порестите среди, дефинирани от Рутвен (Ruthven, 1984). Концептуалният модел на изследването се опира на изотермите на равновесна адсорбция (модели на Лангмюир и Фройндлих), които описват разпределението на замърсителите между течната фаза (водата) и твърдата фаза (повърхността на адсорбента). Анализират се дифузионните ограничения, специфичната порьозност и големината на активната повърхност на активния въглен. Моделът позволява да се изчисли капацитетът на улавяне на тежки метали и устойчиви органични багрила в зависимост от времето на контакт и хидродинамичните параметри на потока, което поставя научната основа за последваща автоматизация на процеса.

1.2.3. **Системен анализ на съществуващите софтуерни и хардуерни решения в сферата на автономната роботика, прилагани за управление на опасни отпадъци** (Gross & Kalra, 2002; Siciliano & Khatib, 2008).

Третият методологически стълб е насочен към системна оценка и софтуерно-хардуерен одит на автономните технологии, способни да менажират и ликвидират последиците от замърсяванията. По отношение на софтуерната архитектура и управлението, методологията прилага принципите за интелигентни агенти и прогностични алгоритми, разработени от Ръсел и Норвиг (Norvig & Russell, 2021). Системният анализ обхваща методите на машинното обучение, обработката на големи масиви от данни (Big Data) от IoT сензори и невронните мрежи за компютърно зрение, използвани за спектрален анализ и автоматизирано разпознаване на химичния състав на отпадъците в реално време. Изследва се как софтуерните агенти могат автономно да оптимизират логистични процеси и да вземат решения в динамична градска или индустриална среда.

От хардуерна и инженерна гледна точка, методологията стъпва върху концепциите, систематизирани в наръчника по роботика под редакцията на Сичилиано и Хатиб (Siciliano & Khatib, 2008). Обект на системен анализ са кинематичните схеми, сензорната интеграция и системите за навигация на Автономните мобилни роботи (AMR) и роботизираните манипулатори. Методологията изследва ефективността на LiDAR технологиите, ултразвуковите скенери и алгоритмите за едновременно локализиране и картографиране (SLAM) при работа на платформите в силно токсични или опасни за човека складови бази и производствени халета. Този подход дава възможност роботиката да се разгледа не просто като механична алтернатива на човешкия труд, а като високотехнологичен инструмент за прецизно екологично инженерство.

2. Аспекти на замърсяването и технологични решения

2.1. Химически аспекти на замърсяването

Един от най-сериозните екологични проблеми с трансграничен характер са киселинните дъждове. Те са породени от изгарянето на изкопаеми горива в енергетиката и транспорта, което води до отделянето на серен диоксид (SO_2) и азотни оксиди (NO_X) в атмосферата (Seinfeld & Pandis, 2016). Взаимодействието на тези газове с атмосферната влага води до протичането на поредица от химични реакции образуване на силни минерални киселини – сярна (H_2SO_4) и азотна (HNO_3) (Seinfeld & Pandis, 2016):

$$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3$$

$$2\ H_2SO_3 + O_2 \rightarrow 2\ H_2SO_4$$

Киселинните валежи понижават pH на почвите и водоемите, увреждат горските масиви и разрушават паметници на културата, изградени от мрамор и варовик.

Основното технологично решение, което приложната химия предлага, е процесът неутрализация. При него киселината реагира с основен агент (оксид, хидроксид или карбонат), в резултат на което се получават безвредни соли и вода. В екологичната практика за неутрализиране на прекомерната киселинност в повърхностните води и почвите масово се използва фино смлян варовик (калциев карбонат – $CaCO_3$), което позволява бързо възстановяване на нарушеното екологично равновесие и биотопа:

$$H_2SO_4 + CaCO_3 \rightarrow CaSO_4 + CO_2 + H_2O$$

2.2. Физикохимично пречистване на води и алтернативни материали

2.2.1. Адсорбционни методи за пречистване чрез активен въглен

За ефективно физикохимично пречистване на промишлени и отпадни води от багрила, тежки метали и органични замърсители се използва методът адсорбция (Ruthven, 1984). Най-широко разпространеният адсорбент е активният въглен, който притежава изключително силна пореста структура и огромна специфична повърхност (до 1500 m^2/g).

Процесът се основава на повърхностни явления, при които молекулите на замърсителя се „улавят“ и задържат върху повърхността на адсорбента чрез вандерваалсови сили (физическа адсробция) или химични връзки (хемосорбция) (Ruthven, 1984). Ефективността на процеса се увлича при оптимизиране на параметри като температура, pH на средата и време на контакт, което прави активния въглен незаменим както в битовите филтриращи кани, така и в мащабните градски пречиствателни станции (Bhatnagar & Sillanpää, 2010).

2.2.2. Биополимерите като алтернатива на традиционните пластмаси

Натрупването на микропластмасата в Световния океан и почвите е една от най-големите екологични кризи на нашия век [Plan]. Традиционните полимери на нефтена основа са устойчиви на биодеградация и се разпадат в продължение на стотици години на микрочастици, които навлизат в хранителната верига (European Commission, 2021).

Модерната наука намира решение чрез синтеза на биополимери (биопластмаси), произведени от възобновяеми биомаси като царевично нишесте, захарна тръстика или целулоза (Garlapati et al., 2015). Полимери като полимлечната киселина (PLA) и полихидроксиалканоатите (PHA) притежават физикомеханични свойства, сходни с тези на полиетилена, но за разлика от него се разграждат

напълно под въздействието на микроорганизми в естествена среда в рамките на няколко месеца, превръщайки се в безопасен за природата компост (Gross & Kalra, 2002; Garlapati et al., 2015)

2.3. Дигитална трансформация: интеграция на роботизацията и изкуствения интелект

Интегрирането на високотехнологични инженерни решения е критична стъпка за минимизиране на въглеродния отпечатък и повишаване на безопасността при управлението на отпадъци.

2.3.1. Приложение на автономни мобилни роботи (AMR)

Автоматизацията става незаменима при третирането на опасни и токсични отпадъци, където рискът за човешкото здраве е неприемлив (Siciliano & Khatib, 2008). Автономните мобилни роботи (AMR), оборудвани с LiDAR системи и ултразвукови сензори, успешно навигират в складови бази и индустриални зони, като транспортират херметически затворени контейнери с токсични товари без пряка човешка намеса (Siciliano & Khatib, 2008).

2.3.2. Роботизирано сортиране и сензорен спектрален анализ

За постигане на висока степен на рециклиране се използват роботизирани манипулатори (роботизирани ръце), работещи в синхрон със сензори за близка инфрачервена спектроскопия (NIR) или лазерно-индуцирана плазмена спектроскопия (LIBS). Тези системи разпознават химичния състав на преминаващите по конвейерната лента отпадъци (различни видове пластмаси, стъкло, метали) за милисекунди и ги сортират с прецизност, недостижима за човешкия фактор.

2.3.3. Изкуствен интелект, IoT системи и прогностичен анализ

Изкуственият интелект (AI) намира приложение чрез невронни мрежи, които обработват големи масиви от данни (Big Data), събрани от IoT сензори в градската среда (Norvig & Russell, 2021). AI алгоритмите оптимизират логистичните маршрути за събиране на отпадъци, прогнозират нивата на запълване на депата и контролират в реално време параметрите на филтриращите инсталации в заводите, което води до драстично намаляване на енергийните разходи и вредните емисии (Norvig & Russell, 2021).

3. Сравнителен анализ на екологичните подходи

За постигане на пълна обективност при оценката на разгледаните дотук научно-приложни решения е необходимо да се извърши систематичен сравнителен анализ. Той съпоставя конвенционалните екологични химични методи (неутрализация и адсорбция) с навлизащите дигитални, автономни технологии (AMR, роботизирано сортиране и изкуствен интелект). Тази съпоставка ни позволява да идентифицираме техните специфични предимства, оперативни ограничения и потенциални синергични точки в борбата за постигане на концепцията за „Нулево замърсяване“.

3.1. Аналитична матрица за технологично съпоставяне

По-долу са систематизирани ключовите критерии за оценка, отразяващи фундаменталните разлики в оперативния обхват, нивото на риск, икономическата устойчивост и гъвкавостта на двата основни похода:

Таблица 1 - Аналитична матрица за сравнение на екологични химични методи и автономни технологични системи

Критерии за сравнение	**Традиционни химични подходи (Неутрализация и Адсорбция)**	**Автономни и дигитални системи (AMR, Роботизирано сортиране и AI)**
Ниво на интервенция и оперативен фокус	Действат директно на молекулно ниво. Физически улавят или химически преобразуват замърсителите в безопасни съединения.	Действат на макониво чрезпространствено позициониране автоматизирана логистика и високоскоростно механично сортиране на отпадъци.
Елиминиране на професионалния риск	Ограничено. Изискват участие на персонал при дозирането на химични реагенти и промяната на филтри, което крие риск при работата с токсини.	Пълно. Изцяло изолират човешкия фактор от вредни среди чрез използване на роботизирани манипулатори и платформи в опасни зони.
Технологична реактивност и адаптивност	Предимно реактивни методи. Прилагат се като последващо решение, след като замърсяването(например	Проактивни и адаптивни системи. Използват прогностични алгоритми за

	киселинен дъжд) вече е налице.	предотвратяване на екологични кризи преди тяхното реално настъпване.
Ресурсен и икономически интензитет	Висок разход на консумативи и суровини (активен въглен, варовик); изискват постоянна физическа регенерация и поддръжка.	Висока първоначална инвестиция в хардуер и софтуер; минимални последващи експлоатационни разходи чрез оптимизация на енергията.

3.2. Аналитичен коментар на резултатите

Проведеният сравнителен анализ ясно показва различията между двете технологични области, но също така разкрива, че те взаимно се допълват.

От една страна, класическите методи на приложната и зелената химия притежават незаменимата способност да въздействат върху микроструктурата на материята. Без химическите процеси на неутрализация и повърхностните явления на адсорбция е теоретично и практически невъзможно да се промени pH на кисела среда или да се извлекат разтворени токсични йони от водни басейни. Въпреки това, тези процеси страдат от липса на гъвкавост, изискват сериозен материален ресурс и често излагат на риск човешките екипи, ангажирани с поддръжката на пречиствателните съоръжения.

От друга страна, решенията в сферата на автономната роботика и изкуствения интелект демонстрират изключителна прецизност, изчислителна мощ и способност за обработка на големи масиви от данни в реално време. Те минимизират въглеродния отпечатък чрез интелигентна оптимизация и премахват необходимостта от човешка намеса в силно токсични среди. Основното ограничение на дигиталните системи обаче се състои в това, че те са софтуерни или механични агенти. Те могат да навигират, картографират, анализират и сортират отпадъци на макониво, но сами по себе си не притежават капацитет да изменят химическата природа на замърсителите на молекулно ниво.

Изводът от направеното съпоставяне е еднозначен: максимална екологична ефективност и сигурност не могат да бъдат постигнати чрез изолираното прилагане на нито един от двата подхода. Истинският научно-приложен пробив се крие в тяхното ефективно обединяване. Интегрирането на

химическите методи като ядро на пречистването и софтуерно-хардуерните комплекси като интелигентна система за управление отваря пътя към качествено ново, проактивно екологично инженерство.

4. Авторски решения и предложения на екипа

Въз основа на проведения анализ, ние, екипът, предлагаме внедряването на нов, интегриран модел за управление на околната среда, който наричаме Интегрирана кибер-физична екосистема за Нулево замърсяване (ICPES-ZP). Нашата споделена приносна позиция се състои в следните конкретни решения:

4.1. Интелигентна адсорбция с IoT автономия: Ние предлагаме филтрите с активен въглен в пречиствателните станции да се оборудват с pH и спектрофотометрични IoT сензори, които в реално време да изпращат данни към AI за степента на насищане на порите на адсорбента.

4.2. Роботизирана подмяна без човешки риск: За да елиминираме професионалния риск при контакт с токсини, ние предлагаме алгоритъм, при който изкуственият интелект автоматично активира Автономен мобилен робот (AMR) за подмяна и капсулиране на филтърната касета в момента, в който капацитетът ѝ се запълни.

4.3. Проактивна защита срещу киселинни дъждове: Ние предлагаме софтуерен модел с невронни мрежи, който анализира промишлените емисии и времето, за да прогнозира киселинни валежи 48 часа по-рано, насочвайки автономни системи за превантивно дозиране на калциев карбонат ($CaCO_3$) в застрашените зони.

Ние вярваме, че тази предложена от нас симбиоза дава на зелената химия необходимата дигитална скорост и прецизност за постигане на реална екологична сигурност.

5. Заключение и изводи

Бъдещето на опазването на околната среда е пряко зависимо от интердисциплинарния подход и симбиозата между фундаменталната химията и дигиталните технологии. Преминаването към по-висока степен на екологична сигурност изисква пълно обединяване на теоретичните открития и инженерната практика. Направеният в тази разработка анализ доказва, че изолираното прилагане на технологиите вече не е достатъчно ефективно и бъдещето принадлежи на интегрираните кибер-физични системи.

5.1. Основни изводи

Въз основа на направения теоретичен анализ, сравнителното съпоставяне и формулираното от нас екипно решение, могат да бъдат изведени следните основни изводи:

5.1.1. Молекулярна основа на пречистването: Методите на зелената химия, и по-специално процесите на неутрализация и адсорбция, остават водещ и икономически ефективен инструмент за директно химическо третиране на киселинни и органични замърсявания в екосистемите.

5.1.2. Елиминиране на човешкия риск: Внедряването на автономната роботиката и изкуствения интелект в логистиката и сортирането елиминира рисковете за хората при работа с опасни вещества и превръща управлението на отпадъци в прецизен, автоматизиран и високопроизводителен процес.

5.1.3. Интегрална връзка чрез ICPES-ZP: Предложената от екипа ни концепция за Интегрирана кибер-физична екосистема доказва, че свързването на IoT сензори, изкуствен интелект и автономни мобилни роботи (AMR) с химическите методи превръща екологичната защита от реактивна в проактивна.

Науката притежава пълния потенциал да защити природата, но това изисква ускорено внедряване на предложените интегрирани иновации в реалната индустрия и ежедневието ни.

Използвана литература:

Anastas, P. T., & Warner, J. C. (2000). Green Chemistry: Theory and Practice. Oxford University Press.

Bhatnagar, A., & Sillanpää, M. (2010). Utilization of agro-industrial and municipal solid wastes as alternative adsorbents for water treatment. Chemical Engineering Journal, 157(2–3), 277–296.

European Commission. (2021). EU Action Plan: Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil.

Garlapati, V. K., et al. (2015). Biopolymers for sustainable development: A review. Environmental Chemistry Letters, 18, 1189–1201.

Gross, R. A., & Kalra, B. (2002). Biodegradable polymers for the environment. Science, 297(5582), 803–807.

Norvig, P., & Russell, S. (2021). Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson.

Ruthven, D. M. (1984). Principles of Adsorption and Adsorption Processes. Wiley-Interscience.

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. John Wiley & Sons.

Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). (2008). Springer Handbook of Robotics. Springer.